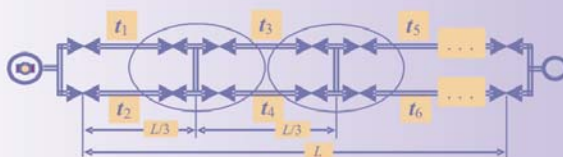


Самойленко Н.И.  
Гавриленко И.А.

# ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ НАДЁЖНОСТЬ ТРУБОПРОВОДНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ



Харьков 2008

**Министерство образования и науки Украины  
Харьковская национальная академия городского  
хозяйства**

**Самойленко Н.И., Гавриленко И.А.**

**ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ НАДЁЖНОСТЬ  
ТРУБОПРОВОДНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ  
СИСТЕМ**

*Под редакцией Самойленко Н.И.*

**Харьков**

**2008**

ББК 65.9(2)441

С17

УДК 681.32:519.713

Рекомендовано Ученым советом Харьковской национальной академии городского хозяйства в качестве монографии, протокол № 9 от 25 апреля 2008 г.

**Самойленко М.И., Гавриленко И.О.**

**С17 Функциональна надійність трубопроводних транспортних систем / За ред. Самойленка М.И. – Харків: ХНАМГ, 2008. – 193 с.**

**ISBN 0–0000–0000–00**

**ББК 65.9(2)441**

**Самойленко Н.И., Гавриленко И.А**

**С17 Функциональная надёжность трубопроводных транспортных систем / Под ред. Самойленко Н.И.– Харьков: ХНАГХ, 2008.–180 с.**

**ISBN 0–0000–0000–00**

**ББК 65.9(2)441**

В монографии излагаются математические модели и методы расчета функциональной надежности трубопроводных транспортных систем со сложной сетевой структурой. Рассматривается использование метода для сравнительного анализа по критерию функциональной надёжности различных конструкций магистральных трубопроводных систем.

Для научных и инженерно-технических работников научно-исследовательских, проектных и производственных организаций, связанных с проектированием и эксплуатацией магистральных и распределительных трубопроводных систем.

Табл. – 7. Ил. – 50. Библиогр. – 49 назв.

#### **Рецензенты:**

зав. кафедры транспортных систем Харьковской национальной академии городского хозяйства, д-р техн. наук, проф. **В.К.Доля;**

зав. кафедры прикладной математики Харьковского национального университета радиоэлектроники, д-р техн. наук, проф. **А.Д.Тевяшев.**

© Харьковская национальная академия городского хозяйства,  
Самойленко Н.И.,  
Гавриленко И.А., 2008



## Содержание

Предисловие. . . . .	6
Раздел 1	
<b>Описание предметной области, обзор проблемы, цели и задачи исследования . . . . .</b>	<b>9</b>
1.1. Общая характеристика трубопроводных транспортных систем как объекта исследования. . . . .	9
1.2. Функциональная надёжность трубопроводных транспортных систем как предмет исследования. . . . .	16
1.3. Анализ показателей качества функционирования трубопроводных транспортных систем . . . . .	21
1.4. Цели исследования. . . . .	27
1.5. Трубопроводные транспортные системы Харьковского региона как практическая база исследований . . . . .	31
1.5.1. Система газоснабжения Харьковского региона . . . . .	31
1.5.2. Система водоснабжения Харьковского региона . . . . .	38
1.6. Роль и место функциональной надёжности в процессах эксплуатации и развития трубопроводных транспортных систем . . . . .	42
1.7. Эксплуатация и развитие трубопроводных транспортных систем с учетом их надёжности . . . . .	50
1.8. Задачи исследования . . . . .	56
Раздел 2	
<b>Методы оценки надёжности трубопроводных транспортных систем . . . . .</b>	<b>59</b>
2.1. Общая характеристика методов и показателей надёжности трубопроводных систем . . . . .	59
2.2. Анализ факторов неопределенности в процессах эксплуатации трубопроводных систем. . . . .	67

## Содержание

2.3.	Анализ потоков отказа и восстановления в трубопроводных транспортных системах . . . . .	69
2.4.	Трубопроводная транспортная система как система массового обслуживания . . . . .	73
2.5.	Усредненные временные показатели нахождения трубопроводной транспортной сети в исправном и неисправном состояниях . . . . .	83

## Раздел 3

<b>Функциональная надёжность распределительных трубопроводных транспортных систем</b>		<b>91</b>
3.1.	Математическая модель трубопроводных транспортных систем. . . . .	91
3.2.	Надёжность аварийно-ремонтных зон распределительной трубопроводной сети . . . . .	96
3.3.	Функциональная надёжность сети относительно потребителей аварийно-ремонтной зоны . . . . .	100
3.4.	Расчёт функциональной надёжности сети относительно аварийно-ремонтной зоны . . . . .	104
3.5.	Основы метода расчета функциональной надёжности трубопроводных сетей . . . . .	111
3.5.1.	Формирование математической модели сложной трубопроводной транспортной сети . . . . .	114
3.5.2.	Разбиение взвешенного графа трубопроводной сети на подграфы аварийно-ремонтных зон . . . . .	114
3.5.3.	Расчет технической надежности аварийно-ремонтных зон . . . . .	126
3.5.4.	Построение взвешенного графа аварийно-ремонтных зон . . . . .	127
3.5.5.	Построение расчётных моделей функциональной надёжности сети . . . . .	129
3.5.6.	Анализ и коррекция расчётных моделей . . . . .	131
3.5.7.	Расчет функциональной надёжности сети . . . . .	132

## Раздел 4

<b>Функциональная надёжность магистральных трубопроводных транспортных систем</b>		<b>136</b>
4.1.	Особенности магистральных трубопроводных транспортных систем и способы повышения их функцио-	

нальной надёжности . . . . .	136
4.2. Функциональная надёжность магистральных трубопроводных транспортных систем с учётом надёжности перемычек и мест их расположения . . . . .	146
4.2.1. Функциональная надёжность двух параллельных трубопроводов с учётом надёжности перемычки . . . . .	147
4.2.2. Оптимальное расположение перемычек в магистральных трубопроводах . . . . .	152
4.3. Метод расчёта функциональной надёжности в анализе конструкций магистральных трубопроводов. . . . .	163
4.3.1. Расчёт функциональной надёжности магистральной сети с перемычками А-типа. . . . .	164
4.3.2. Расчёт функциональной надёжности магистральной сети с перемычками А-типа. . . . .	169
4.3.3. Расчёт функциональной надёжности магистральной сети с перемычками А-типа. . . . .	173
4.3.4. Сравнительный анализ на надёжность магистральных сетей с различным устройством перемычек . . . . .	176
4.4. Магистральная трубопроводная сеть с абсолютной ремонтпригодностью	179
Послесловие . . . . .	183
Словарь терминов . . . . .	185
Список использованной литературы . . . . .	189

## ***Предисловие***

Перевод экономики Украины на рыночные рельсы обуславливает новые производственные отношения между субъектами хозяйственной деятельности и выдвигает новые требования к средствам производства.

Любой предприниматель, вкладывающий личные материальные и денежные средства в производство или несущий ответственность за использование государственных средств, хочет быть уверенным в получении положительного конечного результата. С этой целью разрабатывается бизнес-план, анализ которого может дать ответ на вопрос, какова целесообразность той или иной производственной инновации. Основным показателем бизнес-плана – получаемая прибыль – является очень важной характеристикой эффективности принимаемых решений. Но в условиях жесткой конкуренции руководствоваться только одной прибылью, какой бы она не была заманчивой, – это недопустимая вольность, способная погубить самые перспективные начинания и привести к нежелательным результатам. Чтобы избежать неоправданного риска, следует при оценке эффективности принимаемых решений обязательно учитывать показатель надежности.

Надежность принимаемого решения является гарантом его целесообразности. Если надежность окажется ниже допустимой, то торопиться с принятием решения не стоит, а следует предусмотреть и осуществить мероприятия по её повышению.

Надежность представляет собой комплексное понятие, включающее в себя различные аспекты функционирования сложных производственных систем, определяющее различные особенности принимаемых производственных решений и оценивающее



различные возможные их последствия. В условиях рыночной экономики для достижения высокой экономической эффективности производства необходимо учитывать все качественные и количественные показатели, соответствующие различным компонентам надежности. При этом, наряду с техническими составляющими надежности (безотказность, долговечность, ремонтпригодность и др.), необходимо учитывать функциональные (вероятность решения поставленной задачи, степень удовлетворения потребительских требований и т.п.).

Учитывать какой-либо показатель надежности, будь то качественный или количественный, это означает: анализировать его возможные значения при различных условиях функционирования и различных состояниях производственной системы; искать пути повышения этих значений; сравнивать и выбирать из них наиболее эффективные. В любом случае для учета показателя, особенно количественного, необходимо иметь строгую инженерную методику вычисления значений данного показателя или хотя бы методику оценки этих значений.

Определение количественных показателей надежности для больших и сложных технических систем – это трудная задача, требующая научного подхода, т.е. разработку адекватных математических моделей и методов расчета. Далеко не для всех существующих систем такая задача решена. Даже частичное решение рассматриваемой проблемы (оценка количественного показателя, разработка квазиадекватной модели надёжности, практическая реализация одного или нескольких этапов метода расчета и т.п.) имеет большое значение. Особую актуальность проблема расчета надежности приобретает для сложных транспортных систем, в том числе и трубопроводных, где недооценка надежности может привести к транспортным или экологическим катастрофам.

Настоящая монография посвящена разработке новых математических моделей и методов расчета количественных показателей безотказного функционирования сложных магистральных и распределительных трубопроводных систем. В основу монографии положены исследовательские работы, проводимые на протяжении последнего десятилетия (1998 – 2007 г.г.) коллективом

## Предисловие

ученых кафедры прикладной математики и информационных технологий Харьковской национальной академии городского хозяйства в составе: Самойленко Н.И., Гавриленко И.А., Рудя И.А., Протопоповой В.П., Передерий Т.С.

Авторы полагают, что предлагаемый в данной монографии подход ляжет в основу стандартных методов расчета функциональной надежности сложных инженерных и транспортных сетей, и в первую очередь, сетей магистрального трубопроводного транспорта и коммунальных распределительных систем (водопроводных, тепловых, газопроводных и канализационных).

Авторы благодарят ученых-производственников гл. инж. коммунального предприятия «СПКБ АСУ водоснабжением», д.т.н. Панасенко А.А. и гл. инженера ОАО «Харьковгоргаз», к.т.н. Седака В.С. за консультационную поддержку и предоставление практической базы для апробации научных результатов исследовательской работы по тематике монографии.

*Авторы*

## РАЗДЕЛ 1

### ОПИСАНИЕ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ, ОБЗОР ПРОБЛЕМЫ, ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

#### 1.1. Общая характеристика трубопроводных транспортных систем как объекта исследования

Трубопроводные транспортные системы (ТТС) представляют собой, с одной стороны, подкласс инженерных сетевых систем, с другой – подкласс транспортных систем. Классификационная схема на рис.1.1 иллюстрирует «симбиозный» характер ТТС по отношению к транспорту и инженерным сетям. Данную схему следует считать условной, поскольку она не отражает всего многообразия признаков классификации и, соответственно, всех возможных типов транспортных и сетевых систем. Так, в ней не учитывается то, что транспортные системы могут быть разделены:

- по степени доступа – на системы общего пользования и промышленные;

- по характеру перемещаемых объектов – на пассажирские и грузовые;

- по территориальному признаку – на региональные и общегосударственные (межрегиональные);

- по форме собственности – на частные и государственные;

- по ряду других признаков.

Отметим также, что глубина классификации для трубопроводных систем выше, чем для остальных типов транспортных систем. Объясняется это тем, что основное назначение схемы на рис.1.1 – это не показать саму классификацию, а определить в первом приближении объект дальнейших исследований и его место среди остальных объектов, близких по своей сути.

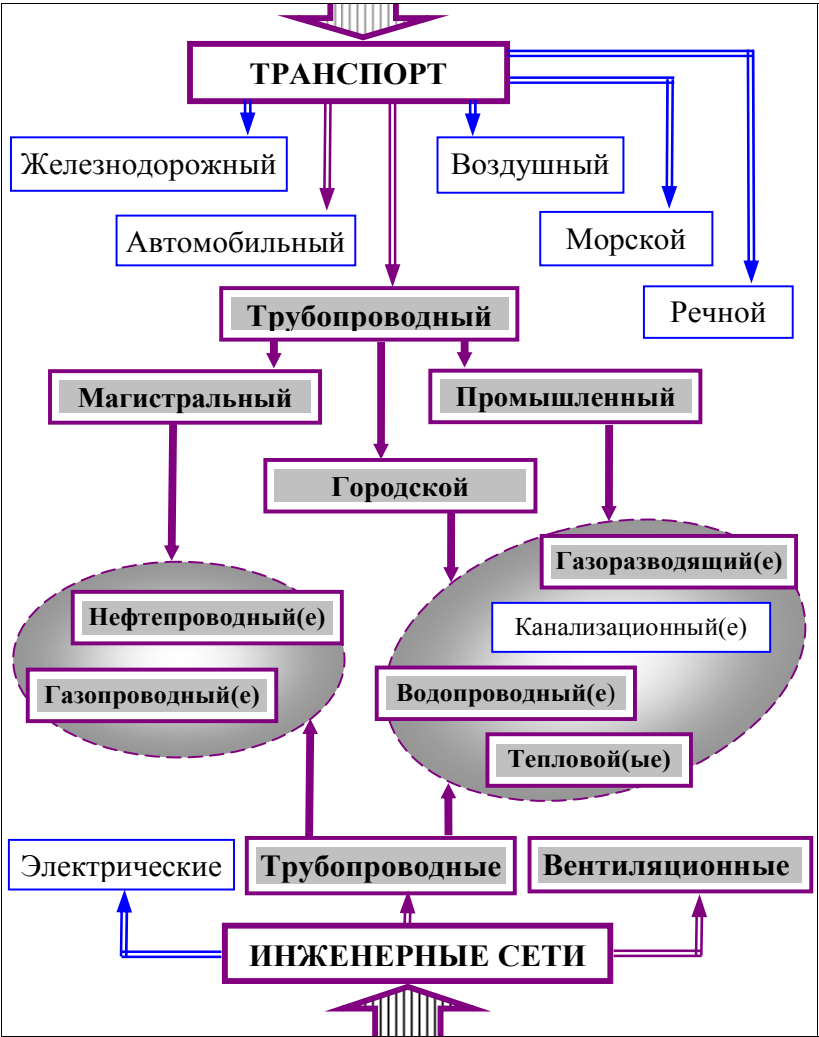


Рис.1.1 – Классификационная схема объекта исследования

Таким образом, схема призвана выделить те сетевые трубопроводные системы, которые являются объектом дальнейшего рассмотрения, и отсечь от них те транспортные системы и инженерные сети, которые не являются таковыми и не могут служить объектом приложения для основных научных результатов настоящей работы. На схеме объект исследования выделен серым фоном и полужирным шрифтом.

Наиболее важные отличительные особенности ТТС заложены в их *назначении* и *сетевой пространственной структуре*. Именно эти особенности и лежат в основе классификационной схемы.

Рассмотрим ключевые особенности (признаки) объекта исследования более подробно.

Все транспортные трубопроводные системы имеют одинаковое назначение, а именно: они должны *обеспечить потребителей систем целевым продуктом в заданном количестве и заданного качества*.

Универсальность определения рассматриваемой особенности – назначения – достигается за счет использования обобщающих терминов: «потребитель», «целевой продукт», «заданное количество», «заданное качество».

В роли потребителей могут выступать как отдельные лица и организации (в муниципальных системах жизнеобеспечения), так и отдельные производственные подразделения, и целые предприятия (в промышленных системах сырьевого обеспечения производства).

В качестве целевого продукта могут выступать питьевая или техническая вода, природный газ, сжатый воздух, тепло, нефть, сыпучие материалы и т.п.

Термин «заданное количество» требует от системы определенной производительности, которая должна быть не ниже требований потребителей. Другими словами, количество поступающей от источников целевого продукта в ТТС должно быть не меньше суммарной потребности в нем. Количество целевого про-

дукта может задаваться в единицах измерения объема, веса, тепла и т.п.

Термин «заданное качество» диктует системе дополнительные требования к транспортируемому продукту. Эти требования, как правило, указывают на нижний допустимый порог тех или иных параметров целевого продукта, помимо его количества. В качестве таких параметров могут выступать давление, температура, степень очистки и др.

Разнообразие возможных значений обобщающих терминов приводит к довольно широкому охвату систем, которые могут считаться объектом исследования.

Конкретизация обобщающих терминов снимает универсальность определения рассматриваемых систем и, в итоге, приводит к выделению из множества существующих ТТС определенного вида систем.

Вторая ключевая особенность объекта исследования – это его конструктивная реализация в виде *пространственной сети трубопроводов*.

Большинство городских (муниципальных) и производственных ТТС являются сложными сетевыми системами жизнеобеспечения. Сетевая структура систем позволяет добиться выполнения их функциональных задач при меньшей суммарной длине трубопроводов.

Действительно, суммарная длина трубопроводов при несетевой организации системы, когда каждый из них соединяет источник целевого продукта только с одним потребителем (рис.1.2,а), намного больше суммарной длины трубопроводов при сетевой организации (рис.1.2,б). В последнем случае несколько потребителей могут обслуживаться одним трубопроводом или несколькими трубопроводами, имеющими общий участок. В последнем случае трубопроводы, примыкающие к конечным пользователям, допускают значительное уменьшение диаметра труб, а, следовательно, и снижение их себестоимости.

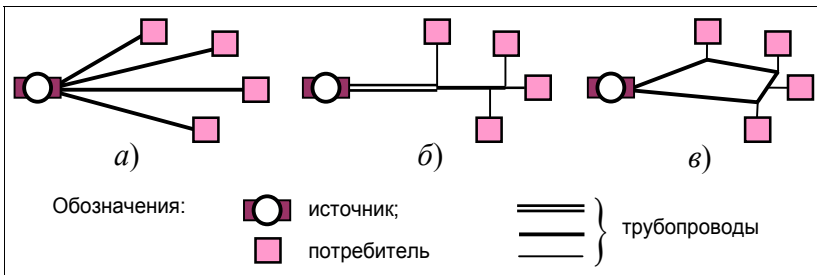


Рис.1.2 – Возможные структуры трубопроводных систем

Сетевая организация системы, как правило, позволяет транспортировать целевой продукт к потребителю по нескольким маршрутам (рис.1.2,в). В этом случае выход из строя какого-либо трубопровода не приводит к прекращению поставки продукта потребителю независимо от того, где в сети находится поврежденный трубопровод. В реальных трубопроводных системах жизнеобеспечения часто прибегают к кольцеванию трубопроводов (рис.1.2,в) или их расположению в «сотовом» порядке, продиктованном конфигурацией жилых кварталов. Такая организация ТТС усиливает сетевой характер системы и обеспечивает высокую функциональную надежность системы.

Таким образом, сетевая организация ТТС способствует, с одной стороны, сокращению капитальных и эксплуатационных затрат за счет уменьшения суммарной длины трубопроводов и рационального выбора диаметра труб, с другой – повышает вероятность выполнения функциональных задач системы за счет её структурной избыточности.

Рассмотренные особенности ТТС как объекта исследования являются необходимыми, однако не могут считаться достаточными. Так, например, тепловые сети попадают в круг систем, выступающих в качестве объектов исследования. Но не потому, что обладают ключевыми особенностями. Определяющим в данном случае является то, что целевой продукт (тепло) поступает к потребителю посредством носителя (воды, пара, воздуха), циркулирующего в тепловой сети, под *давлением*. Другой пример. Канализационные сети, согласно схеме на рис.1.1, не входят в понятие «объект исследования». Но, если канализационная сеть яв-

ляется *напорной* или имеет в своём составе *напорную* подсеть, то она может выступать в качестве объекта исследования.

Приведенные примеры говорят о необходимости дальнейшего уточнения признаков, определяющих объект исследования.

Все транспортные и сетевые системы подчиняются первому постулату инженерных сетей, известных как первое правило Кирхгофа [15,23]. Любые потоки груза, пассажиров, целевого продукта или носителей целевого продукта в любой точке системы не могут исчезать бесследно или появляться из ничего. Поэтому суммы входящих и исходящих потоков в любом узле или в любом сечении потокопровода равны между собой. Поскольку первое правило Кирхгофа справедливо для всех транспортных и сетевых систем, то оно не может выступать в роли отличительного признака объекта исследования.

Совсем иначе обстоит дело со вторым постулатом инженерных сетей, т.е. со вторым правилом Кирхгофа [23]. Ему подчиняются все инженерные сети без исключения. А из всех типов транспортных систем второе правило Кирхгофа справедливо только для напорного трубопроводного транспорта. Следовательно, оно наилучшим образом характеризует объект исследования. Учет второго постулата позволяет исключить из рассмотрения все виды транспорта, кроме трубопроводного, и в то же время – распространить понятие «объект исследования» на напорные отводящие системы.

Таким образом, основные отличительные признаки объекта исследования, можно представить в виде следующих требований:

- объект исследования должен представлять собой систему трубопроводов с сетевой структурой;
- потоки целевого продукта или их носителей в сети трубопроводов должны подчиняться 2-му правилу Кирхгофа.

В соответствии с приведенными признаками магистральные трубопроводные системы могут выступать в качестве объекта исследования только в том случае, если они представляют собой сеть трубопроводов (рис.1.3).



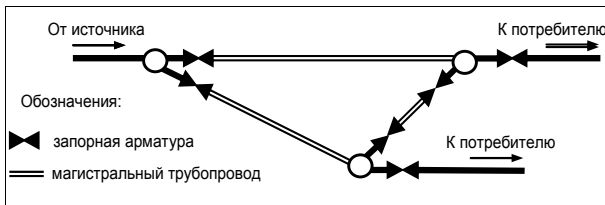


Рис.1.3 – Простейшая сеть магистральных трубопроводов

Примером сетевых магистральных систем могут служить два параллельных магистральных трубопровода, соединенных перемычками (рис.1.4).

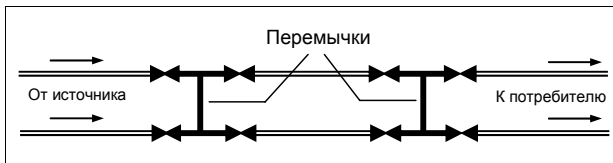


Рис.1.4 – Магистральный транспорт

Самотечные трубопроводные системы, будь то водопроводные или канализационные, не могут выступать в качестве объекта исследования, поскольку для них не справедлив второй постулат сетей.

Все ТТС с указанными признаками, имеют идентичные математические модели, несмотря на различную физическую природу входящих в них величин. Как правило, математические модели отражают сетевую структуру и потокораспределение в ТТС и формируются на основе 1-го и 2-го правил Кирхгофа, а также законов, определяющих связь между последовательными и параллельными переменными потоков [15].

ТТС имеют не только близкие по своей сути математические модели, но также и близкие области их использования. Более того, использование одних из них предполагает использование других в качестве обеспечивающих. Так, функционирование систем водоснабжения немыслимо без систем водоотведения, вентиляции и подогрева. Системы газо,- нефте- и теплоснабжения,

кроме основных трубопроводных сетей, используют дополнительные водопроводные и вентиляционные сети как для технического обслуживания самих сетей, так и для бытового обслуживания рабочего персонала. В свою очередь, вентиляционные сети при отсутствии доступа к электрическим силовым линиям могут иметь для питания компрессорных установок дополнительные сети, обеспечивающие подачу жидкого или газообразного топлива и отвода отработанных продуктов сгорания.

## **1.2. Функциональная надежность трубопроводных транспортных систем как предмет исследования**

Современные трубопроводные транспортные системы представляют собой сложные инженерные сооружения, требующие для своего создания и бесперебойной длительной эксплуатации больших материальных затрат. Эти затраты связаны, с одной стороны, с необходимостью удовлетворять текущую потребность населения в том или ином целевом продукте, с другой – обеспечивать бесперебойную работу сети в обозримом будущем, т.е. в течение некоторого периода времени  $T$ .

Все трубопроводные транспортные системы относятся к системам жизнеобеспечения населения (городские ТТС) или создают условия для их нормального функционирования (магистральные ТТС). В любом случае даже временный выход из строя любой системы приводит к крайне нежелательным последствиям, а порой к тяжелым социальным потрясениям или экологическим катастрофам.

В связи с исключительной социальной значимостью ТТС каждое коммунальное предприятие или любое другое производственное подразделение по эксплуатации такой системы несет административную и уголовную ответственность за её техническое и функциональное состояние. Службы эксплуатации на каждый текущий момент времени должны обеспечить нормальную работу ТТС, т.е. её соответствие техническим требованиям и своему назначению, а также предусмотреть и обеспечить способность системы выполнять технические и функциональные требования в течение определенного срока, иногда довольно продолжительно-

го. При этом основными критериями оценки нормальной работы сети считаются:

- 1) количественное удовлетворение потребностей в целевом продукте;
- 2) качественное удовлетворение потребностей в целевом продукте;
- 3) достаточная (не ниже допустимой) техническая и функциональная надежность.

Первый критерий оценки работы ТТС связан с мощностью перекачивающих станций, компрессорных и насосных установок, а также с пропускной способностью магистрального трубопровода или распределяющей сети трубопроводов. Критерий считается основным, поскольку нарушение требований относительно минимально допустимых поставок целевого продукта неизбежно приводит к сокращению числа потребителей или нарушению их прав, что противоречит назначению сети и существующим гражданским законам.

Второй критерий требует от целевого продукта определенного качества. Если требование предъявляется к величине напора, под которым целевой продукт поступает потребителю, то второй критерий функционально связан с первым. В этом случае следует рассматривать оба критерия совместно. Они органически дополняют друг друга. Если к целевому продукту предъявляются требования, которые касаются степени очистки целевого продукта, его температуры, плотности, концентрации, состава и пр., то второй критерий становится вполне независимым, а его значимость может приравниваться к значимости первого критерия и даже превосходить. Низкое качество целевого продукта также противоречит назначению сети и приводит в итоге к потере потребителей.

Третий критерий оценивает надежность ТТС, т.е. её способность в течение определенного периода времени оставаться в технически исправном состоянии и отвечать своему назначению, т.е. выполнять возложенные на неё функциональные задачи. Оценки и технической надежности, и функциональной надежности в равной степени важны для эксплуатационных служб. Обе надежности связаны между собой: без надлежащей технической

надежности трудно добиться требуемой функциональной надежности.

С точки зрения потребителей, второй заинтересованной стороны, нормальная работа ТТС оценивается по тем же критериям, по которым она оценивается службами эксплуатации. Безусловно, каждый потребитель желает иметь определенное количество целевого продукта определенного качества, а также иметь уверенность в «завтрашнем дне», т.е. в том, что он будет получать целевой продукт в нужном ему количестве и нужного качества в течение некоторого оговоренного периода времени.

Единственное отличие в требованиях, которые предъявляются эксплуатационниками и потребителями к ТТС состоит в том, что потребителей не интересует техническое состояние всей системы. Их интересы ограничиваются личными потребностями. Любому потребителю достаточно быть уверенным, что к месту его подключения в ТТС целевой продукт будет поставляться в заказанном количестве, заказанного качества и в течение заказанного периода времени. Другими словами, для потребителя важной является оценка только функциональной надежности системы, и его совершенно не интересует, как технически она достигается и реализуется. Да и функциональная надежность потребителя волнует только в той её части, которая касается лично его.

Таким образом, функциональная надежность, несмотря на её зависимое положение от технической надежности, играет исключительно важную роль в эксплуатации систем. В обеспечении высокой функциональной надёжности в равной степени заинтересованы и службы эксплуатации, и все потребители.

Функциональная надежность ТТС является предметом исследования настоящей монографии. Поэтому дальнейшие исследования, в первую очередь, будут касаться именно этого показателя функционирования ТТС.

Чтобы облегчить понимание сути всех этапов исследования и избежать какой-либо путаницы между технической и функциональной надёжностями, дадим определения этим ключевым показателям системы.

**Технической надёжностью** будем называть способность элемента ТТС (устройства, агрегата, отдельного участка, всей сети, подсети и пр.) находится в работоспособном состоянии. Под количественным показателем технической надёжности будем понимать вероятность безотказной работы элемента ТТС в течение определенного периода времени  $T$ .

Техническая надёжность элементов системы определяется по их техническим паспортам или накопленным статистическим данным. Техническая надёжность всей системы (подсистемы, части системы) определяется расчётными методами, если известны надёжности всех элементов системы, или статистическими методами в противном случае.

Будем считать, что техническая надёжность каждого элемента системы не зависит от структуры системы и работоспособности других элементов системы. Из этого следует, что выход из строя одних элементов не влечет за собой выход из строя других.

В зависимости от того, как определяется работоспособность всей системы, различают несколько различных расчётных моделей технической надёжности системы.

Если система считается работоспособной тогда, когда работоспособны все её элементы, то имеет место последовательная расчётная модель. В этом случае надёжность системы рассчитывается по формуле

$$P_{\neq}(A) = \prod_{i=1}^n p_i, \quad (1.1)$$

где  $A$  – событие, определяющее работоспособность системы в течение определенного периода времени  $T$ ;  $p_i$  – вероятность безотказной работы  $i$ -го элемента системы в течение того же периода времени  $T$ ;  $n$  – общее количество элементов в системе

Если система считается работоспособной тогда, когда работоспособен хотя бы один её элемент, то имеет место параллельная расчётная модель. В этом случае надёжность системы рассчитывается по формуле

$$P_{\text{=}}(A) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i), \quad (1.2)$$

где  $A$  – событие, определяющее работоспособность системы в течение определенного периода времени  $T$ ;  $p_i$  – вероятность безотказной работы  $i$ -го элемента системы.

Если работоспособность системы определяется более сложными отношениями между работоспособностями отдельных элементов, то имеет место смешанная расчетная модель. В этом случае надёжность системы рассчитывается по специальной методике (см. Приложение А).

Для оценки технической надёжности ТТС наиболее полезной является последовательная модель с расчетной формулой (1.1). Параллельная и смешанные модели используются намного реже: первая – для расчёта технической надёжности зарезервированных участков сети; вторая – для оценки работоспособности насосного узла с сетевой структурой соединения насосных агрегатов.

**Функциональной надёжностью** будем называть способность ТТС удовлетворять своему назначению или, что то же самое, успешно решать свои функциональные задачи. Для ТТС – это поставлять целевой продукт потребителям с количественными и качественными параметрами, оговоренными в двухсторонних договорах. Под количественным показателем функциональной надёжности будем понимать вероятность выполнения системой конкретной функциональной задачи в течение некоторого определенного периода времени  $T$ .

Функциональная надёжность системы, как правило, определяется на основе статистической обработки данных о поведении системы, накопленных за довольно большой промежуток времени эксплуатации системы. Расчетные методы определения функциональной надёжности системы на основе известных технических надёжностей её элементов разработаны и применимы только для систем малой размерности. Связано это со сложностью формализации влияния структуры системы на её функциональную надёжность.

В зависимости от количества функциональных задач системы различают столько же показателей функциональной надёжности системы. В рамках настоящей монографии рассматриваются только два типа показателей. Первый касается поставки целевого продукта конкретному потребителю, второй – всем потребителям или отдельной группе потребителей.

Как уже отмечалось, функциональная надёжность тесно связана с технической. Более того, для некоторых систем эта связь настолько тесная, что можно ограничиться рассмотрением только технической надёжности. В таких случаях характер изменения функциональной надёжности в процессе эксплуатации системы совпадает характером изменения технической надёжности. Такую картину можно наблюдать в магистральных трубопроводных системах со слабо выраженной сетевой структурой и в сложных сетевых системах трубопроводов при большом числе источников. В системе с одним источником и одним потребителем показатели технической и функциональной надёжностей вообще совпадают.

Поскольку функциональная и техническая надёжности сильно связаны между собой, то обе они будут постоянно находиться в поле нашего внимания.

### **1.3. Анализ показателей качества функционирования трубопроводных транспортных систем**

Анализ показателей работы ТТС говорит о том, что часть из них касается целевого продукта (степень очистки, температура, концентрация и т.д), часть – сети трубопроводов, отдельных её участков или конструктивных элементов (техническая и функциональная надёжность), а часть – и того и другого (показатели, связанные с параметрами потокораспределения). Первые из указанных показателей не зависят от сетевой структуры и других конструктивных особенностей ТТС, а остальные, наоборот – находятся в полной зависимости.

Поскольку предметом исследования является функциональная надёжность, то все показатели работы ТТС, её структурные параметры и параметры потокораспределения будем рассматривать с точки зрения их связи с надёжностью.

Все показатели, в той или иной мере, связаны с надежностью системы. Например, показатели качества целевого продукта при их отклонении от нормативных снижают надежность ТТС. Наличие нежелательных примесей в целевом продукте может привести к коррозии или засорению трубопроводов, что сокращает срок их службы или препятствует подаче целевого продукта потребителю. Коррозия через изменение показателя технической надежности, а засорение непосредственно оказывают влияние на функциональную надежность. Аналогично обстоит дело и с параметрами потокораспределения. Значительные избыточные напоры ускоряют износ труб, и, в конечном итоге, могут привести к их разрыву. Недостаточные напоры приводят к срыву поставок запланированных объемов целевого продукта. Значительные избыточные напоры через изменение показателя технической надежности, а недостаточные напоры непосредственно также оказывают влияние на функциональную надежность.

Напрашивается вывод: чем меньше суммарное отклонение всех параметров функционирования ТТС от нормативных и чем выше техническая надежность всех элементов ТТС, тем выше её функциональная надёжность.

Поскольку сделанный вывод носит эмпирический характер, то, естественно, представляет большой интерес разработка математической модели функциональной надежности как функции, зависящей от отклонений параметров функционирования ТТС и технической надежности её элементов. Формализация такой зависимости является сверхсложной задачей, рассмотрение и решение которой не укладывается в рамки проведенных авторами исследований. Достаточно сказать, что только в системе городского обеспечения питьевой водой качество целевого продукта зависит более, чем от 100 параметров. Техническая надежность системы – это интегрированный показатель, который определяется рядом параметров надежности ТТС. При этом каждый параметр надежности системы зависит от соответствующих параметров надежности отдельных элементов системы. А количество последних может превышать 1000, и даже 10000. Аналогичную картину можно наблюдать и с показателем качества потокораспределения, который должен учитывать параметры потокораспределения (расходы и напоры) на каждом участке ТТС.



К сказанному следует добавить, что влияние отдельных параметров на функциональную надежность может быть противоречивым. Так, снижение напоров целевого продукта приводит к повышению технической надежности системы (снижается вероятность разрыва труб), что положительно сказывается на функциональной надежности системы. С другой стороны, снижение напоров приводит к недопоставке целевого продукта потребителям, что отрицательно сказывается на функциональной надёжности.

Следует также учитывать, что степень влияния отдельных показателей функционирования (как всей ТТС, так и её элементов в отдельности) на функциональную надежность различна. Кроме того, сама функциональная надежность системы, с точки зрения потребителя, также различна и зависит от места подключения последнего к трубопроводной сети.

Таким образом, даже поверхностный взгляд на задачу формализации функциональной надежности говорит об исключительной её сложности и громоздкости. Решение такой задачи требует усиленной работы больших коллективов ученых и производственников с весьма насыщенными программами исследований. Авторы ни в коей мере не претендуют на её комплексное решение.

Как было отмечено ранее, показатели качества целевого продукта не зависят от сетевой структуры системы и других конструктивных особенностей ТТС и влияют на функциональную надежность косвенным образом – через техническую надежность. Поэтому влиянием показателей качества целевого продукта на функциональную надёжность можно пренебречь или считать, что показатели качества учтены при определении или задании технической надёжности отдельных элементов ТТС.

Далее, параметры потокораспределения, хотя и зависят от структуры сети, тем не менее, по условию эксплуатации они должны иметь значения, которые:

- во-первых, не больше предельно допустимых технических норм, т.е. такие значения, которые практически не влияют на техническое состояние ТТС;
- во-вторых, не ниже допустимых потребительских норм.

Если указанные условия выполняются, то ТТС полностью отвечает своему назначению, обеспечивая потребителей целевым продуктом в заданных количествах и заданного качества. Другими словами, если изменения параметров потокораспределения не выводят их из области допустимых значений, то функциональная надёжность  $P^f$  от этих параметров не зависит:

$$(h_{i\min} \leq h_i(t) \leq h_{i\max}) \& \left( \left[ q_{i\min} - \int_0^T q_i(t) dt \right] \leq 0 \right) \Rightarrow \quad (1.3)$$

$$\Rightarrow \frac{\partial^2 P_i^f}{\partial h_i \partial q_i} = 0, \quad \overline{1, n}, \quad (1.4)$$

где  $n$  – общее количество потребителей;  $T$  – период времени, на который рассчитывается функциональная надёжность  $P^f$ ;  $t$  – текущее время от начала расчетного периода,  $t \in \{0, T\}$ ;  $P_i^f$  – функциональная надёжность системы относительно  $i$ -го потребителя;  $h_{i\min}$  – минимально допустимое давление на  $i$ -м потребителе, обусловленное договором между  $i$ -м потребителем и предприятием, эксплуатирующим ТТС;  $h_{i\max}$  – максимально допустимое давление на  $i$ -м потребителе, не влияющее на техническое состояние ТТС;  $q_{i\min}$  – требуемое количество целевого продукта для  $i$ -го потребителя, обусловленное договором между  $i$ -м потребителем и предприятием, эксплуатирующим ТТС;  $h_i(t)$ ,  $q_i(t)$  – текущие значения параметров потокораспределения (напора и расхода) на  $i$ -м потребителе.

Логическая импликация (1.3) – (1.4) в каждый момент времени  $t$  имеет место для подавляющего числа потребителей,  $t \in \{0, T\}$ . Поэтому влиянием параметров потокораспределения на функциональную надёжность можно также пренебречь или можно условиться, что функциональная надёжность рассматривается относительно потребителей, для которых требования поставки це-

левого продукта и технические требования эксплуатации ТТС полностью выполняются.

Таким образом, приходим к следующим заключениям:

- функциональная надёжность ТТС при нормативной эксплуатации системы инвариантна к изменениям показателей качества целевого продукта и параметров потокораспределения;

- функциональная надёжность в процессе эксплуатации ТТС зависит от технической надёжности элементов системы и структуры трубопроводной сети, т.е. от порядка соединения элементов системы в сетевое образование.

Напомним, что в настоящих исследованиях внимание сосредотачивается на двух показателях функциональной надёжности, связанных с бесперебойной поставкой целевого продукта. Один определяет надёжность системы по отношению ко всем потребителям, другой – по отношению к конкретному потребителю или конкретной группе потребителей.

В первом случае функциональная надёжность системы связана с технической надёжностью всех элементов системы и представляет интерес для эксплуатационников и тех потребителей, которые ещё только собираются подключиться к сети.

Во втором случае функциональная надёжность определяет способность ТТС поставлять целевой продукт конкретному потребителю. Для разных потребителей или групп потребителей она может быть одинаковой, а может и резко отличаться. В данном показателе заинтересованы все субъекты, участвующие в процессе транспортировки и распределения целевого продукта: и поставщики, и потребители, как реальные, так и потенциальные. Но наиболее заинтересованным лицом в каждом конкретном показателе  $P_i^f$  является, безусловно,  $i$ -й потребитель,  $i \in \{\overline{1, n}\}$ . При этом для  $i$ -го потребителя система из  $n$  логических импликаций (1.3) – (1.4) превращается в одну  $i$ -ю импликанту,  $i \in \{\overline{1, n}\}$ .

Техническая надёжность – это комплексное свойство, которое в зависимости от назначения ТТС и условий её эксплуатации может включать *безотказность, долговечность, ремонтпри-*

*годность* и *сохраняемость* в отдельности или определенное сочетание этих свойств как для системы в целом, так и его частей. Из перечисленных свойств, с точки зрения потребителя, только безотказность имеет прямое отношение к функциональной надёжности. Особенно это проявляется при непрерывной поставке целевого продукта потребителю с непрерывным производственным циклом. Объясняется это тем, что безотказность – это свойство системы или отдельных её участков непрерывно сохранять *работоспособность*. Потребителя, в первую очередь, волнует работоспособность системы, и в гораздо меньшей степени – как эта работоспособность достигается. Именно поэтому мы условились в предыдущем разделе понимать под технической надёжностью вероятность безотказной работы системы или отдельного его участка в течение некоторого периода времени  $T$ , а под функциональной надёжностью – вероятность бесперебойной поставки целевого продукта конкретному потребителю в заданных количествах и заданного качества за этот же период времени.

Чтобы быть уверенным в выполнении условий (1.3) в текущий момент времени  $t$  ( $0 < t < T$ ) для  $i$ -го потребителя  $i \in \overline{1, n}$ , необходимо произвести расчет параметров потокораспределения  $h_i$  и  $q_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ . Данные параметры зависят друг от друга, от общей структуры системы и выбранного режима работы напорных агрегатов. Определение значений параметров  $h$  и  $q$  для конкретного потребителя связано с полным расчетом потокораспределения по всей сети. Расчет производится на основе решения системы уравнений, полученных с помощью 1-го и 2-го правил Кирхгофа. Компьютерный расчет потокораспределения даже для сложной коммунальной сети практически производится в реальном масштабе времени [20]. Расчет позволяет ответить не только на вопрос, отвечает ли система в текущий момент времени своему назначению или нет. Основное назначение расчета – обеспечить возможность управления потокораспределением. Расчет показывает эксплуатационникам ТТС, насколько необходимо скорректировать параметры потокораспределения в случае их отклонения от требуемых. Соответствующая коррекция пото-

кораспределения возвращает систему в рациональный и технически безопасный режим работы.

Как видим, проведение расчета потокораспределения вызвано, в первую очередь, необходимостью управлять самим потоко-распределением, а проверка логического выражения (1.3) – это его второстепенная роль.

#### **1.4. Цели исследования**

Чтобы в процессе эксплуатации ТТС можно было каким-либо образом управлять потокораспределением система должна обладать определенной степенью свободы: запасом развиваемой мощности напорных установок и возможностью выбора режимов работы этих установок, структурной избыточностью сети трубопроводов и подключаемых к сети напорных установок, а также возможностью изменения режима работы и структуры сети. Такая свобода, т.е. возможность находиться в различных состояниях, конструктивно предусмотрена в каждой ТТС. Изменение состояний системы достигается с помощью переключения режима работы напорных установок или изменения положения запорной арматуры.

Несколько иначе обстоит дело с управлением функциональной надежностью. В действующих ТТС, как правило, не предусмотрен механизм управления функциональной надёжностью по трём основным причинам:

- нет методики расчета данного показателя для сложных сетевых трубопроводных систем;
- имеет место недооценка показателя функциональной надежности на этапе проектирования и начальных этапах эксплуатации;
- отмечается невысокая степень свободы трубопроводной системы по отношению к управлению функциональной надёжностью.

Среди приведенных причин основной является отсутствие методики расчета показателя функциональной надёжности. В настоящее время данный показатель интуитивно учитывается на

разных этапах проектирования, эксплуатации, реконструкции и развития ТТС, а также интуитивно изменяется в процессе функционирования системы. Но учет и изменение функциональной надёжности на качественном уровне («хуже» – «лучше») не может гарантировать безошибочность управленческих решений для сложных систем. Только количественная оценка надёжности может позволить и качественно проектировать, реконструировать, развивать ТТС, и эффективно управлять ею в процессе эксплуатации.

Вторая причина обусловлена особенностями динамики показателей надёжности в процессе эксплуатации трубопроводных систем. В отличие от других показателей качества эксплуатации ТТС, значения которых являются инвариантными по отношению к сроку эксплуатации, значимость показателя надёжности изменяется по экспоненциальному закону: на начальном этапе эксплуатации системы она наибольшая, а затем уменьшается по мере износа системы. Недооценка надёжности ТТС на начальных этапах может привести к очень печальным последствиям, нежелательных как для эксплуатационников системы, так и для её потребителей.

Третья причина – малая степень свободы трубопроводной системы – по отношению к управлению функциональной надёжностью не является столь критичной, как две предыдущие. Во-первых, управлять надёжностью можно непосредственно и оперативно, изменяя структуру сети с помощью запорной арматуры. Такое управление имеет смысл, когда при разных структурах сети основные показатели качества (без учёта показателей надёжности) имеют одинаковые значения или незначительно отличаются при резком отличии показателей надёжности.

Во-вторых, управлять надёжностью можно косвенно – через изменение технической надёжности отдельных элементов системы с помощью реновации, т.е. с помощью проведения профилактических работ по восстановлению элементов, частично утративших надёжность, или ремонтных работ по обновлению тех элементов, нормативный срок службы которых истёк. Такое управление функциональной надёжностью требует определенной задержки во времени, обусловленной и определяемой продолжи-

тельностью проведения регламентных работ по восстановлению и обновлению ненадёжных элементов.

Учёт и управление функциональной надёжностью также важны, как учёт и управление потокораспределением. ТТС являются неотъемлемыми частями систем жизнеобеспечения населения и систем ресурсного обеспечения промышленных предприятий. Нормальное функционирование ТТС – это необходимое условие для нормальной жизни граждан, а высокая эффективность функционирования этих систем – это одно из условий благополучия муниципальной и региональной экономики. Поскольку ТТС конструктивно базируются на сложных инженерных сетях, а их функциональная надёжность – это гарантия функционирования систем в настоящий момент времени и в обозримом будущем, то пренебрегать этим показателем не только нецелесообразно, но и преступно.

Для эффективного учета и управления функциональной надёжностью на различных этапах проектирования, эксплуатации, реконструкции и развития ТТС со сложной сетевой структурой требуется наличие инженерной методики для количественного определения функциональной надёжности.

*Целью научных исследований*, положенных в основу настоящей монографии, являются развитие теории надёжности трубопроводных транспортных систем со сложной сетевой структурой и разработка инженерной методики количественного определения показателей технической и функциональной надёжностей таких систем, что позволит:

- *проектировщикам* ТТС:
  - конструировать сетевые системы с заданными показателями технической и функциональной надёжности;
  - сравнивать проекты ТТС по критериям технической и функциональной надёжности;
  - оптимизировать сетевые структуры по критериям технической и функциональной надёжности;
  - осуществлять реконструкцию действующих ТТС с учетом показателей технической и функциональной надёжности;

- рационально развивать действующие ТТС с учетом показателей технической и функциональной надёжности;

- *эксплуатационникам* ТТС:

- обеспечивать эксплуатацию сетевых систем с заданными показателями технической и функциональной надёжности;

- управлять при необходимости показателями технической и функциональной надёжности;

- заключать договора с потребителями с учетом показателей технической и функциональной надёжности;

- формировать для проектных организаций техническое задание и технические условия на реконструкцию и развитие действующей ТТС с учетом показателей технической и функциональной надёжности;

- выдавать аварийно-ремонтным и восстановительно-профилактическим службам технические задания и технические условия для проведения ремонтных и профилактических работ с учетом показателей технической и функциональной надёжности;

- *эксплуатационникам и потребителям* ТТС:

- анализировать текущие и прогнозировать будущие состояния ТТС с учетом показателей технической и функциональной надёжности;

- *потребителям целевого продукта* ТТС:

- выбирать место подключения к сети трубопроводов с учетом показателей технической и функциональной надёжности;

- формировать для служб эксплуатации требования на изменение показателей технической и функциональной надёжности в случае производственной необходимости;

- *экспертам МЧС*:

- проверять соблюдение норм эксплуатации ТТС с точки зрения их экологической безопасности;

- предупреждать возможность экологической катастрофы по причине несоблюдения норм эксплуатации ТТС;

- осуществлять анализ состояния ТТС при расследовании причин катастрофы.



Как видим, достижение поставленной цели позволяет грамотно выполнять очень много различных мероприятий и по проектированию, и по эксплуатации, и даже по экологической безопасности. Одни из них выполняются часто, например, анализ состояния ТТС, другие – реже, как например, изменение функциональной надёжности по требованию потребителя. Последнее, как правило, связано с резким изменением характера потребления целевого продукта. Но все целевые мероприятия чрезвычайно важны для нормальной и надёжной работы ТТС.

### **1.5. Трубопроводные транспортные системы Харьковского региона как практическая база исследований**

Город Харьков и Харьковская область относятся к одним из самых развитых в промышленном отношении регионов Украины и бывшего СССР. На территории города и области располагаются типичные для крупных городов трубопроводные напорные системы со сложной сетевой структурой. В первую очередь, к ним следует отнести систему газоснабжения города и области, городские сети водо- и теплоснабжения. Трубопроводные системы существуют и постоянно развиваются на протяжении многих лет. Так, развитие старейшей в Украине системы газоснабжения г. Харькова начинается со второй половины XIX века. Система водоснабжения региона, в частности г. Харькова и пгт. Кочеток [34, стр. 56-65], часто выбирались в качестве базовых для проведения исследований по проблемам качества водоснабжения и прогнозированию водопотребления. Проблемы трубопроводных и транспортных систем региона характерны для систем большинства регионов бывшего СССР. Именно системы г. Харькова и Харьковской области служили практической базой для проведения исследований в рамках настоящей монографии.

#### **1.5.1. Система газоснабжения Харьковского региона**

Система газоснабжения Харьковского региона – одна из наибольших и старейших на Украине. Её развитие начинается с 1871

г., когда коксовый газ впервые был применен для освещения улиц г. Харькова, и в дальнейшем стал использоваться для бытовых потребностей.

В 1932 г. было положено начало планового развития газоснабжения города, а для обслуживания системы газоснабжения создан трест «Харгаз».

С 1956 г. город переведен на природный газ из Шебелинского месторождения, началась бурная газификация г. Харькова. В течение последующих 10 лет были газифицированы все предприятия и жилищный фонд. Была разработана уникальная кольцевая система газоснабжения города. В 1980 г. с введением в эксплуатацию газопровода высокого давления между газораспределительными станциями ГРС–1 и ГРС–4 кольцо высокого давления вокруг г. Харькова было замкнуто. Завершилось выполнение «Перспективного плана развития системы газоснабжения г. Харькова на 1976 – 1980 г.г.». Практически город был переведен на трёхступенчатую систему газоснабжения (рис.1.5). Кольцо высокого давления вокруг г. Харькова с пятью газовыми распределительными станциями и одиннадцатью промежуточными распределительными станциями обеспечило поставку газа населению и промышленным предприятиям с высокой функциональной надёжностью.

Вслед за харьковским кольцом высокого давления было построено аналогичное кольцо вокруг г. Москвы.

В 1996 г. на базе государственного предприятия по газоснабжению и газификации организовано открытое акционерное общество (ОАО) «Харьковгаз». Газовые сети и их сооружения, а также специальный автотранспорт аварийно-ремонтного назначения остаются в собственности государства.

В 2002 г. общий объём транспортирования газа ОАО «Харьковгаз» составил 2098 млн. м<sup>3</sup>, темп роста транспортирования газа относительно 2001 г. – 105,6%.

На круговой диаграмме, представленной на рис.1.6, показано распределение транспортируемого газа между основными его потребителями в г. Харькове.

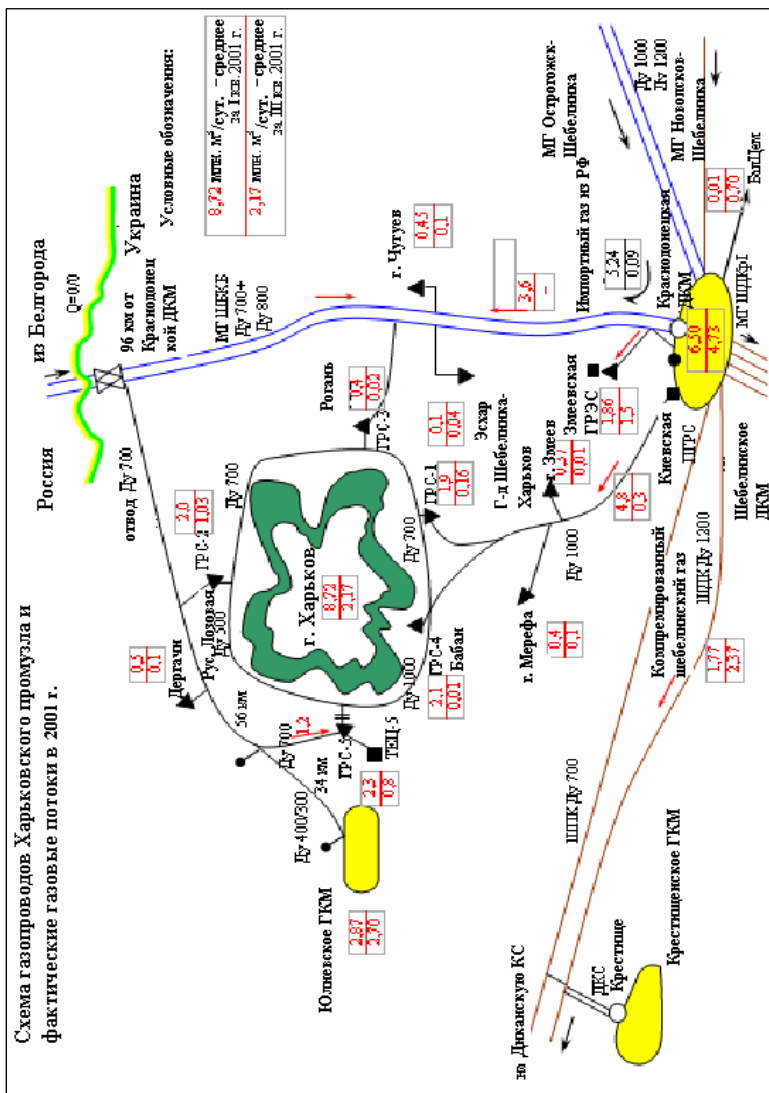


Рис.1.5 – Схема газоснабжения Харьковского региона

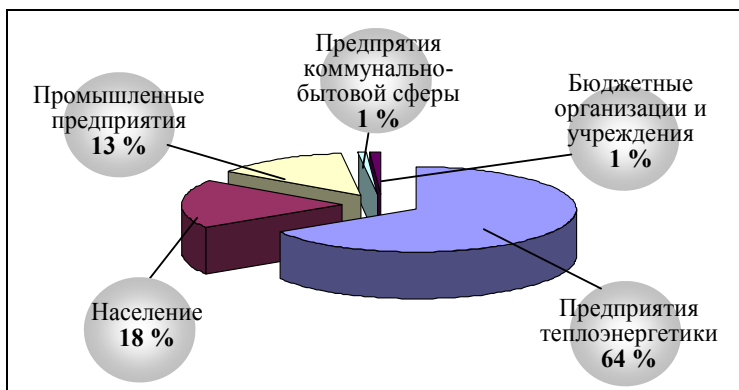


Рис.1.6 – Круговая диаграмма газопотребления в г. Харькове

В начале третьего тысячелетия в промышленном секторе города газифицировано более 300 предприятий, в коммунально-бытовом секторе – более 2,5 тысяч объектов, в жилищно-коммунальном – около полумиллиона квартир. Удельный вес газифицированных квартир составляет 4,6 % от общего количества по Украине.

ОАО «Харьковгаз» имеет трехуровневую систему управления с рабочим персоналом, насчитывающим более двух тысяч человек. Основные направления деятельности акционерного общества:

- предоставление услуг по газоснабжению и транспортированию природного газа объектам всех форм собственности;
- выполнение комплекса работ по техническому обслуживанию подземных и воздушных газопроводов, сопутствующих сооружений, газового оборудования газораспределительных пунктов (ГРП), жилых домов, коммунально-бытовых объектов, промышленных предприятий;
- проведение контроля, диагностики и анализа коррозионного состояния газопроводов;
- выполнение работ по техническому обслуживанию, наладке и ремонту трубопроводов;

- ремонт и проверка трассообнаруживающих приборов и газоанализаторов;
- комплексное приборное обслуживание газопроводов;
- определение степени коррозионной агрессивности грунтов, одоризации газа, его компонентного состава и теплотворности;
- метрологическое обеспечение учета газа: ремонт и проверка расходомеров, контроль бытовых счетчиков газа, ремонт и проверка контрольно-измерительных приборов;
- организация, развитие и обслуживание технических средств информации и автоматизация решения задач административной, финансовой и хозяйственной деятельности организации;
- разработка схем газоснабжения, создание рабочих проектов газоснабжения микрорайонов города, промышленных предприятий, коммунально-бытовых объектов, жилых домов;
- строительство и реконструкция трубопроводной системы газоснабжения;
- строительство и реконструкция производственных объектов организации;
- выполнение работ по газификации домов, коммунально-бытовых объектов, учреждений и промышленных предприятий с установкой счетчиков газа и обеспечивающего оборудования;
- ремонт газового оборудования, изготовление запасных деталей и нестандартного оборудования;
- обучение, стажировка и повышение квалификации кадров организации.

Все направления деятельности ОАО «Харьковгаз», кроме приборного обслуживания и автоматизации, непосредственно связаны с функциональной надёжностью системы. Особенно важно включать вопросы надёжности в программу повышения квалификации инженерных кадров.

Система газоснабжения г. Харькова состоит из:

- 5-и газораспределительных станций (ГРС), расположенных вокруг города и подающих газ в кольцо высокого давления диаметром 500 мм под давлением 1,2 МПа;

- 12-и промежуточных газораспределительных пунктов (ПГРП), которые снижают высокое давление газа до среднего (до 0,3 Мпа) и подают его в кольцо среднего давления, питающего промышленные предприятия и коммунально-бытовые объекты города;

- 872-х газорегулирующих пунктов (ГРП), снижающих давление газа от среднего до низкого и подающих газ населению для бытовых нужд;

- 4241-го километра газопроводов, из которых 74% подземного залегания, и газообеспечивающих сооружений.

Из кольца г. Харькова 7–10% общего объема газа транспортируются в два района области (Харьковский и Дергачевский) и г. Люботин.

Кольцевая структура системы газоснабжения города способствует повышению её функциональной надёжности в целом и функциональной надёжности поставки газа конкретным потребителям в отдельности. Но поскольку система является эволюционирующей, то различные трубопроводные участки эксплуатировались в течение разных сроков. Так, 82% (3448 км) трубопроводной сети прослужили более 25 лет, 30% (1195 км) – более 35 лет, 10% (361 км) – более 45 лет и полностью изношены. Естественно, и техническая, и функциональная надёжность системы требуют тщательного исследования.

По результатам паспортизации и мониторинга газопроводов и сопутствующих сооружений выявлено 0,51 км аварийных газопроводов, которые требуют капитального ремонта, 195,1 км – санации и перекладки.

Для газопроводов г. Харькова характерно естественное физическое старение металла труб и изоляции. Положение ухудшается ещё и тем, что 90% газопроводов находятся в зонах опасного влияния блуждающих токов. Анализ количества утечек газа из подземных газопроводов показывает, что 80% из них возникают из-за электрохимической коррозии, спровоцированной блуждающими токами. Неуправляемое разрушение металлических трубопроводов – угроза возникновения техногенных аварий.

Для решения проблемы защиты газопроводов в г. Харькове, как и в других городах и регионах, необходимо:

- выполнение мероприятий по ограничению блуждающих токов, порождаемых рельсовой сетью электротранспорта;
- установка защитных устройств от коррозии для обеспечения катодной поляризации подземных металлических коммуникаций и сооружений.

На протяжении только 2002 г. ОАО «Харьковгаз» осуществило снабжение газа по 1200-м договорам в размере 40 млн.м<sup>3</sup>. Ежемесячно производится расчёт необходимых объёмов потребления газа для г. Харькова и формируется заявка на лимиты газа для предприятий. Однако отбор газа предприятиями осуществляется со значительными нарушениями лимитов. Так, коммунальное предприятие «Тепловые сети», основной потребитель системы, может в несколько раз превысить месячный лимит. Непланные отборы газа приводят к снижению давления в системе до критических значений. ГРП и другие объекты системы работают на байпасе (в аварийном режиме), что недопустимо по условиям эксплуатации. Нарушение договоров на поставку газа в конечном итоге приводит к снижению надёжности системы.

В сложившейся ситуации необходимо принятие кардинальных мер по повышению технической и функциональной надёжности системы газоснабжения Харьковского региона.

В настоящее время в ОАО разработаны и внедряются три программы по улучшению состояния и повышению безопасности газоснабжения:

- программа повышения эффективности работы и развития службы аварийно-восстановительных работ;
- программа повышения эффективности работ по электрохимзащите;
- программа по техническому переоснащению, автоматизации производственных процессов и переходу на новые технологии эксплуатации, строительства и реновации систем газоснабжения.

К сожалению, программа по разработке и внедрению методов расчета надёжности сложных инженерных сетей, которая могла

бы *оценить* результаты вышеперечисленных программ, не предусмотрена. А она, в отличие от других программ, не требует больших материальных и финансовых затрат.

### **1.5.2. Система водоснабжения Харьковского региона**

Технологическое производственное объединение (ТПО) «Харьковкоммунпромвод», осуществляющее водоснабжение в Харьковском регионе, имеет одну из наиболее развитых систем водоснабжения в Украине. Только по г. Харькову эксплуатируется 278,8 км водоводов с 1701,2 км водопроводных сетей.

Для водоснабжения региона ТПО «Харьковкоммунпромвод» использует три независимых источника:

- река Северский Донец с Печенежским водохранилищем;
- Краснопавловское водохранилище канала Днепр–Донбасс;
- артезианские скважины.

За счет трех источников ТПО решает задачу круглосуточного и бесперебойного водоснабжения региона. Суммарная подача воды потребителям по системе группового водоснабжения в среднем составляет около 800 тыс.м<sup>3</sup> в сутки. Технологическая схема подачи воды потребителям (рис.1.7) организована таким образом, что часть из них обслуживается непосредственно из магистральных водоводов, а часть – через систему подачи и распределения воды (СПРВ). Существующих мощностей вполне достаточно для водоснабжения региона, однако необходимо отметить, что 95% всей воды, поставляемой потребителям из поверхностных источников, не отвечает требованиям Государственных Санитарных Норм и Правил. Поэтому возникает необходимость в дальнейшем развитии водоснабжения из подземных источников и доведении их доли в снабжении до 20–25%. А при очищении воды из поверхностных источников необходимо применить новейшие водоочистительные технологии.



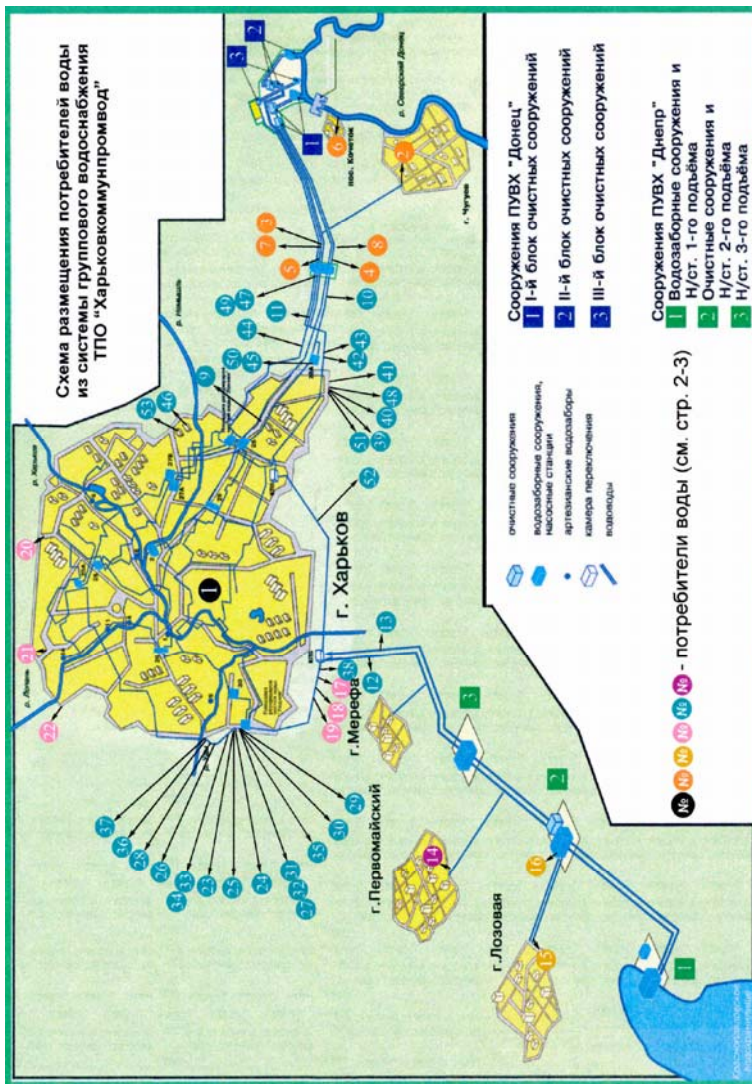


Рис. 1.7 – Схема размещения потребителей системы водоснабжения ТПО “Харьковкоммунпромвод”

Отсутствие инвестиций и оборотных средств в ТПО в последние годы привело к предкризисной ситуации в СПРВ. Протяженность технически изношенных водоводов и водопроводных сетей, требующих срочной санации и замены, составляет 637,5 км. При расчетной норме замены и санации сетей и водоводов 50 км/год фактически ежегодно перекладывается 5–8 км, т.е. 10–16%. При таких темпах восстановления сетей из-за отсутствия средств потребуется около 80-и лет для замены 637,5 км технически изношенных сетей. С учетом дальнейшего старения и наращивания темпов технического износа основных фондов это может привести к неконтролируемым процессам разрушения системы водоснабжения. К тому же, планово-предупредительные ремонты по обслуживанию арматуры на сетях (водопроводные колодцы, задвижки, пожарные гидранты, водозаборные колонки) выполняются не в полном объеме.

Количество аварийных ситуаций на водопроводных сетях увеличивается ежегодно на 5–10% и достигает 5 тыс./год. Характер повреждений на трубопроводах города свидетельствует, что за последнее десятилетие сложилась устойчивая тенденция к неуклонному возрастанию свищей на стальных трубах. Из общего количества повреждений они составляют 62% при общей протяженности 452,7 км, или 22,6%.

Анализ структуры водопотребления в г. Харькове за последние годы показывает, что около 90% воды расходуется на бытовые нужды населения. А уровень эксплуатации внутридомовых систем водоснабжения крайне низкий, вследствие чего нерациональные потери целевого продукта составляют более 25% от поданного в жилые дома.

В последние годы на работу СПРВ значительно влияет практически полное отсутствие циркуляционных систем горячего водоснабжения в жилищном фонде и несоблюдение режимов подготовки горячей воды. Это приводит к возрастанию расходов газа, холодной воды и электроэнергии на подготовку горячей воды в системах теплоснабжения. Кроме того, система водоснабжения вынуждена работать в нерациональном режиме с избыточными давлениями, которые превышают проектные.

Чтобы компенсировать нерациональные потери, насосные станции переводятся на режимы с повышенным давлением, что, в свою очередь, приводит к увеличению всё тех же нерациональных потерь и дополнительно провоцирует возникновение аварийных ситуаций. Такая эксплуатация СПРВ приводит к повышенной аварийности.

Таким образом, современное состояние водоводов и распределительных сетей оценивается как состояние, которое не отвечает одному из главных критериев эксплуатации – технической и функциональной надёжности.

Для стабилизации и дальнейшего развития предприятий водопроводного хозяйства необходимо проведение мероприятий, направленных на повышение надёжности системы водоснабжения. С целью повышения надёжности и эффективности функционирования системы водоснабжения Харьковского региона, внедрения новых методов управления в сфере договорных отношений между участниками рынка услуг принято Постановление кабинета министров Украины от 20 декабря 2000 г. № 1844 «О повышении надёжности и эффективности функционирования систем водоснабжения г. Харькова и других населенных пунктов Харьковской области».

Этим Постановлением предусмотрено на базе ТПО «Харьков-коммунальвод» до 2010 г. отработать организационные, экономические и технические стратегические направления развития водоснабжения населенных пунктов Украины, а именно:

- отработка методов структурной перестройки;
- внедрение научных разработок и пилотных проектов;
- разработка и внедрение инвестиционных программ;
- разработка новых технологий в проведении реконструкции и обеспечении эксплуатации систем водоснабжения;
- реализация одобренных мероприятий по повышению надёжности, эффективности и безопасности систем водоснабжения Харьковского региона на 2000–2010 г.г. и финансирование этих мероприятий за счёт государственных централизованных капитальных вложений, средств местных бюджетов, средств инвесторов, в т.ч. иностранных, и за счёт собственных средств ТПО.

Основой практической реализации мероприятий по всем перечисленным направлениям развития систем водоснабжения может быть только разработка *новых математических методов расчета технической и функциональной надёжности* систем водоснабжения, которые позволят как реализовывать запланированные мероприятия по всем направлениям развития, так и оценивать количественно результаты этих мероприятий.

### **1.6. Роль и место функциональной надёжности в процессах эксплуатации и развития трубопроводных транспортных систем**

Процессы, протекающие внутри ТТС, как и в любой другой эволюционирующей системе, безусловно, протекают во времени и пространстве. Поскольку любая ТТС со временем претерпевает значительные и многочисленные территориальные изменения, то для процессов в ТТС важна как временная, так и пространственная динамика. Отметим, что изменения структуры сети в большей степени ассоциируются с пространственными изменениями (длина трубопроводов, диаметр труб, топография сети), изменения состояния сети – с временными изменениями (суточные, недельные и сезонные колебания потребления, старение, износ), а развитие сети – и с теми, и другими.

Чтобы учесть все процессы в сложно организованных ТТС, взаимно их согласовать и увязать с различными подсистемами, производственными службами и системными функциональными задачами, необходимо провести системный анализ типовой ТТС.

Прежде чем перейти к системному анализу, перечислим основные общесистемные задачи, возникающие в процессе эксплуатации и развития ТТС:

1. Прогнозирование годовых трендов потребления, а также ввода новых потребителей и разработок новых месторождений целевых продуктов.
2. Развитие трубопроводной сети: проектирование, эксплуатация и реконструкция.

3. Разработка и внедрение новых методов улучшения качества целевого продукта, повышения надежности всей системы в целом и отдельных ее элементов, научно-исследовательские разработки в области рационального развития трубопроводных систем.

4. Краткосрочное прогнозирование потребления (месячное, недельное, суточное) для вычисления необходимых объемов производства и резервирования целевого продукта для покрытия дефицита в моменты пикового потребления.

5. Составление режимных карт для активных элементов трубопроводной системы (насосных и компрессорных станций, перекачивающих аппаратов, регулирующих пунктов) в зависимости от наружной температуры, дня недели, времени суток и других критичных параметров.

6. Расчет траекторий перевода системы из одного стационарного режима в другой с учетом динамики переходных процессов для предотвращения нежелательных последствий резких изменений давления. В частности, расчет гидравлического удара.

7. Проведение профилактических работ с целью повышения надежности системы.

8. Управление материально-техническими запасами и проведение расчетов с потребителями и поставщиками.

9. Проведение мероприятий по предупреждению загрязнения окружающей среды.

10. Сбор и обработка оперативной технологической информации по параметрам, характеризующим состояние среды, системы снабжения и потребителей.

11. Управление режимами работы приближенных к потребителям активных элементов трубопроводной системы по составленным режимным картам.

12. Аварийно-спасательные работы, локализация и устранение последствий аварий, включая экологические последствия.

13. Отслеживание расчетных траекторий перевода трубопроводной системы из одного режима в другой при изменении структуры и состояния трубопроводной системы.

Вербальная постановка задач представляет собой составные и запутанные лексемы, что затрудняет их понимание и анализ. Внесение каких-либо изменений в функциональную структуру ТТС или изменение требований к информационному обеспечению системы достаточно трудно отследить, а тем более промоделировать. Поэтому для анализа ТТС целесообразно применить CASE-технологии [5], которые основаны на методологиях структурного или объектно-ориентированного анализа и проектирования, использующих спецификации в виде диаграмм или текстов для описания внешних требований, связей между моделями системы, динамики поведения системы. Эти методологии закреплены в наборе правил, графических элементов и действий, связанных с ними. Такой набор носит название нотации. Одной из базовых нотаций является нотация IDEF0. Здесь CASE-средства и нотация IDEF0, в частности, использованы для иллюстрации проведенного ниже анализа процессов функционирования в ТТС и ее подсистемах.

Модель в нотации IDEF0 представляет собой совокупность иерархически упорядоченных и взаимосвязанных диаграмм. Сначала проводится описание системы в целом и ее взаимодействия с окружающим миром, после чего приводится функциональная декомпозиция – система разбивается на подсистемы. Процессы, функции или задачи моделируемой системы представляются в виде работ. Работы изображаются в виде прямоугольников. Взаимодействие работ с внешним миром и между собой описывается в виде стрелок. Такая группа образует контекстную диаграмму (рис.1.8).

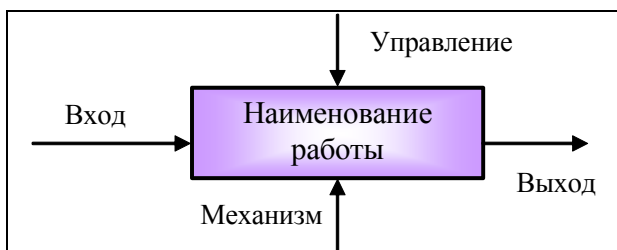


Рис.1.8 – Контекстная диаграмма

В рамках настоящих исследований анализ процессов эксплуатации и развития в ТТС проведен с помощью пакета BPwin. На сегодняшний день пакет BPwin является одним из самых простых и эффективных средств для решения задач системного анализа и проектирования систем. Пакет позволил максимально систематизировать основные функции системы, составить существующую модель процессов и показать, как она изменится при контроле и учете функциональной надёжности системы, обосновать и подтвердить ранее выдвинутую потребность в методах расчёта функциональной надёжности, ответить на вопрос, кому и зачем необходимо иметь методику расчёта функциональной надёжности.

Традиционно при исследовании вопросов рационального развития трубопроводной сети ее основная часть – трубопроводная распределительная система – рассматривалась как отдельный объект, функционирующий в некоторой среде [17]. При таком подходе к среде относят внешние подсистемы и неуправляемые на данном уровне подсистемы.

Используем прием искусственного выделения объекта из среды для изучения процессов функционирования ТТС в целом. К внешней среде отнесем экологическую и экономическую обстановку в городе и государстве, потребителей, природные источники и месторождения целевого продукта, поставщиков, а также высшее руководство. Выделяя в соответствии с CASE-технологией механизмы, вход, выход и управление, построим функциональную диаграмму, которая представлена на рис.1.9.

На диаграмме двойная стрелка соответствует управлению по критерию надёжности. К сожалению, управление существующими ТТС по критерию надёжности не производится по причине отсутствия методов расчёта функциональной надёжности для сложных эволюционирующих систем. Поскольку данные методы являются предметом настоящих исследований, то присутствие «Требования по надёжности» на диаграмме не является случайным. Более того, в данном системном анализе оно является ключевым, а сам анализ призван определить роль и место надёжности в эксплуатации и развитии ТТС.

На функциональной диаграмме, представленной на рис.1.9, связь «Требования по надёжности» говорит о необходимости учета надёжности на всех этапах развития и эксплуатации ТТС. При этом предпочтение должно отдаваться не интуитивному учёту с привлечением эвристических методов расчёта надёжности, а формализованному учёту с помощью математически обоснованных методов.



Рис.1.9 – CASE-диаграмма связи трубопроводной транспортной системы с внешней средой

ТТС имеет два выхода во внешнюю среду: «Целевой продукт» и «Эффективность». Первый выход соответствует основному назначению системы удовлетворять потребности потребителей. Второй выход определяет целесообразность существования системы: если поставки ЦП будут осуществляться неэффективно, то система вступит в конфликт с внешней средой, приводящий к гибели всей системы.



Учитывая функциональные требования и характеристику исследуемого объекта, выделим основные подсистемы:

1. Административная подсистема.
2. Подсистема основного производства.
3. Подсистема вспомогательного производства.
4. Организационно-экономическая подсистема.

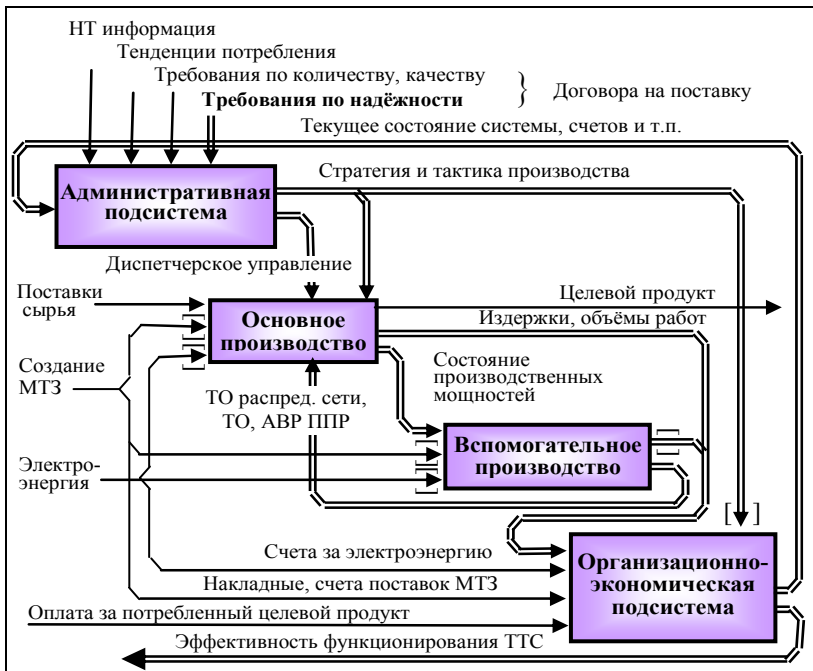


Рис.1.10 – CASE-диаграмма взаимосвязи подсистем

Все перечисленные подсистемы связаны в единое целое посредством входов, выходов и управленческих воздействий. Схема взаимосвязи подсистем приведена в виде CASE-диаграммы на рис.1.10. На диаграмме выделены две связи с внешней средой

и все связи между подсистемами ТТС, которые имеют отношение к надёжности, а именно:

- связь «Требования по надёжности», определяющая на основании «Договора» нижний допустимый уровень функциональной надёжности системы по отношению к конкретному потребителю;

- связь «Стратегия и тактика производства», учитывающая «Требования по надёжности» и определяющая задания на развитие основного и вспомогательного производства;

- связь «Диспетчерское управление», учитывающая «Требования по надёжности» и устанавливающая нормы функциональной надёжности, которыми должны руководствоваться диспетчеры в процессе оперативного управления системой;

- связь «Издержки, объёмы работ», информирующая «Организационно-экономическую подсистему» о невыполнении поставок за счёт потери функциональной надёжности (аварии и др. внештатные ситуации в «Основном производстве») и о работах по поддержанию требуемой функциональной надёжности («Реконструкция, ТО, АВР, ППР» во «Вспомогательном производстве») для оценки текущего состояния системы и адекватного расчёта эффективности её функционирования;

- связь «Состояние производственных мощностей», информирующая «Вспомогательное производство» о текущей функциональной надёжности трубопроводной сети в целом и отдельных её участков для последующей организации работ по техническому обслуживанию, аварийно-восстановительным и планово-предупредительным работам («ТО, АВР, ППР»);

- связь «ТО распред. сети, АВР, ППР», определяющая работы по поддержанию требуемой функциональной надёжности сети, в т.ч. реконструкции сети, которая может быть обеспечена мощностями вспомогательного производства;

- связь «Текущее состояние системы, счетов и т.п.», включающая текущее состояние системы по функциональной надёжности и информирующая о ней «Административную подсистему» для планирования производства и распределения ЦП;

– связь «Эффективность функционирования ТТС», учитывающая все показатели эксплуатации водопроводной сети, в т.ч. функциональную надёжность, и определяющая конкурентоспособность системы – без учёта функциональной надёжности система обречена на гибель.

Следует заметить, что диаграмма не учитывает влияние функциональной надёжности системы на состояние подсистемы «вспомогательное производство» и состояние внешней среды. А такое влияние имеет место. Чем выше надёжность системы, тем:

- реже происходят внештатные ситуации;
- реже накладываются штрафные санкции;
- меньше расходуется ЦП в непроизводительных целях;
- меньше оказывается социальный и экологический ущерб;
- меньше содержится штатных единиц в ремонтных службах;
- меньше требуется ремонтной техники и транспорта;
- меньше расходуется и заготавливается материалов на ремонтные работы;
- выше оказывается привлекательность системы для новых потребителей и т.п.

Как видно из диаграммы, функциональная надёжность оказывает непосредственное или косвенное влияние на работу всех подсистем. Эффективное решение всех общесистемных задач, приведенных в начале подраздела и возникающих на различных этапах эксплуатации и развития ТТС, не может быть получено без учета функциональной надёжности.

Проведенный системный анализ является довольно усеченным, поскольку охватывает только самый верхний уровень управления и функционирования системы. Но даже частично проведенный анализ подтверждает актуальность и своевременность исследовательских работ по разработке методов расчета функциональной надёжности, без которых невозможен её учет для эффективного решения общесистемных задач, а значит, и для эффективности функционирования системы в целом.

### **1.7. Эксплуатация и развитие трубопроводных транспортных систем с учетом их надёжности**

Напомним, что целью настоящего научного исследования являются *развитие* теории надёжности трубопроводных транспортных систем со сложной сетевой структурой и *разработка* инженерной методики количественного определения показателей технической и функциональной надёжности таких систем. Цель полностью отвечает основным положениям всех программ по дальнейшему развитию систем газоснабжения и водоснабжения крупных городов Украины и соответствующим постановлениям Кабинета министров Украины.

В достижении поставленной цели заинтересованы как потребители ТТС, так и проектировщики, и эксплуатационники, и эксперты по внештатным ситуациям. Но наиболее заинтересованной стороной являются диспетчерские службы коммунальных предприятий и управлений по эксплуатации ТТС.

Диспетчеры в течение рабочей смены часто принимают решения, связанные с изменением сетевой структуры систем. Необходимость в изменении структуры возникает каждый раз, когда:

- вводят в сеть новый участок или выводят старый;
- добавляют новый источник или отказываются от старого;
- включают дополнительный насосный агрегат или отключают действующий;
- подключают нового или отключают старого потребителя;
- ставят участок сети на профилактику или вводят его в эксплуатацию по завершению профилактических работ;
- меняют изношенные участки на новые.

Кроме перечисленных регламентных ситуаций могут возникать и внештатные ситуации. В течение только одних суток в водопроводной сети крупного города может произойти до 10-и серьёзных аварий и более. При возникновении любой аварии диспетчер обязан оперативно принять меры по её локализации и устранению. Несвоевременное устранение аварии может привести к катастрофическим последствиям.

Естественно, аварийные участки должны быть выведены из структуры сети на время её устранения.

Любое изменение структуры ТТС влечет за собой изменение её технической и функциональной надежности. Если при этом надежность опускается ниже минимально допустимой, возникает дополнительная угроза катастрофы от предприятий-потребителей с непрерывным циклом производства.

При изменении структуры сети диспетчер должен выбрать наиболее рациональный режим дельнейшей работы системы. Существующий подход к выбору режима основан на расчете критерия минимума суммарных избыточных напоров в узлах сети и не предусматривает при этом даже оценки показателей технической надёжности. Поэтому факт падения функциональной надежности ниже минимально допустимой остается просто незамеченным. Последнее обстоятельство часто является причиной возникновения так называемых цепных аварий. Ситуация осложняется еще и тем, что не существует методики оперативного расчета или хотя бы оценки функциональной надежности в зависимости от изменения структуры сети. Именно поэтому диспетчер в процессе принятия решений не может учитывать количественные показатели надежности. Он также не может сравнивать между собой варианты допустимых решений по критерию надежности и выбирать из них тот, который обеспечит максимально возможную надежность в сложившейся ситуации.

Отсутствие методики расчета показателей надежности для сложных сетевых структур отрицательно сказывается на организации работ по устранению аварий. Только с помощью точного расчета надежности можно квалифицированно расставить приоритеты для одновременно возникших или одновременно устраняемых аварий. Только точный расчет может показать, устранение какой аварии обеспечивает наиболее весомое увеличение надежности системы в целом и надёжности поставки целевого продукта отдельным потребителям.

Не менее важен расчет надежности для организации работ по реновации трубопроводов – профилактике и восстановлению физически изношенных участков. Здесь точный расчёт надёжности позволяет не только выявлять ненадёжные участки или подсети, а и квалифицированно составлять график профилактических работ для всей сети.

Аналогичная ситуация имеет место при проектировании сетей или их реконструкции. Только точный расчет может дать ответ на вопрос, какой из вариантов изменения структуры сети с точки зрения надёжности является предпочтительнее и насколько предпочтительнее.

Поскольку показатели технической и функциональной надёжности в процессе эксплуатации ТТС либо не учитываются, либо учитываются на интуитивном уровне, то эксплуатация ТТС не может считаться эффективной как с точки зрения достижения конечной цели (поставки целевого продукта всем потребителям в заданном количестве и заданного качества), так и с точки зрения экологической безопасности.

Предлагаемый подход эксплуатации и развития ТТС строится на основе модификации существующих подходов, путём добавления к ним ряда новых положений, требующих *контроль, учёт и обеспечение количественных показателей надёжности* на всех этапах эволюции ТТС.

Суть нового подхода заключается в следующем.

Пусть на момент времени  $t$  решение  $r^*$  по проектированию или управлению ТТС, связанное с изменением структуры сети, выбирается из множества  $\mathbf{R}$  альтернативных вариантов,  $\mathbf{R} = \{r_j\}$ ,  $j = \overline{1, m}$ . Принятие любого решения  $r_j$  и его реализация приводит к новой структуре сети с новым состоянием, которое характеризуется набором величин:

–  $h_{ji}(t)$ ,  $q_{ji}(t)$  – напор (давление) и расход на  $i$ -м потребителе целевого продукта в ТТС после принятия и реализации  $j$ -го варианта решения,  $i = \overline{1, n_j}$ ;

–  $n_j$  – общее число потребителей, подключенных к ТТС, после принятия и реализации решения  $r_j$ ;

–  $K_j(t)$  – показатель эффективности функционирования ТТС, при выборе  $j$ -го варианта решения;

–  $p_{ji}^f(t)$  – функционал от технической надёжности элементов ТТС, определяющий функциональную надёжность ТТС относительно  $i$ -го потребителя при выборе  $j$ -го варианта решения.

Тогда выбор любого варианта решения  $r_j$ , связанного с изменением структуры сети ТТС на любом этапе её эволюции (проектирования, эксплуатации, расширения, реконструкции) должен сопровождаться *количественным анализом показателей надёжности*.

*Примечание.* При проектировании трубопроводных систем с использованием предлагаемого подхода следует принять  $t = 0$ , поскольку в процессе проектирования никакого износа и старения элементов ТТС не происходит. В этом случае значение функционала  $p_{ji}^f(t)$  определяется расчётным путём с использованием значений технической надёжности элементов ТТС, взятых из технических паспортов, т.е. при сроке эксплуатации всех конструктивных элементов системы  $t = 0$ .

Предлагаемый подход после проведения традиционно обязательного расчёта и проверки на допустимость показателей поточкораспределения для каждого альтернативного варианта структуры сети требует в обязательном порядке осуществления количественного расчёта и проверки на допустимость показателей функциональной надёжности. В случае получения отрицательного результата в ходе проверки отношения  $p_{i \text{ доп.}}^f \leq p_{ji}^f$  хотя бы для одного потребителя, следует от  $j$ -го альтернативного решения отказаться.

Так, для проектировщиков, ремонтных и диспетчерских служб ТТС процедура принятия решения может соответствовать схеме алгоритма, приведенного на рис.1.11. Здесь формирование множества вариантов решений  $\mathbf{R} = \{r_j\}$  ( $j = \overline{1, m}$ ) осуществляется эвристическими методами на основании опыта лиц, принимающих решение, или задаётся компетентными службами, например, при проведении экспертизы. Величина  $G$  – отвлеченная констан-

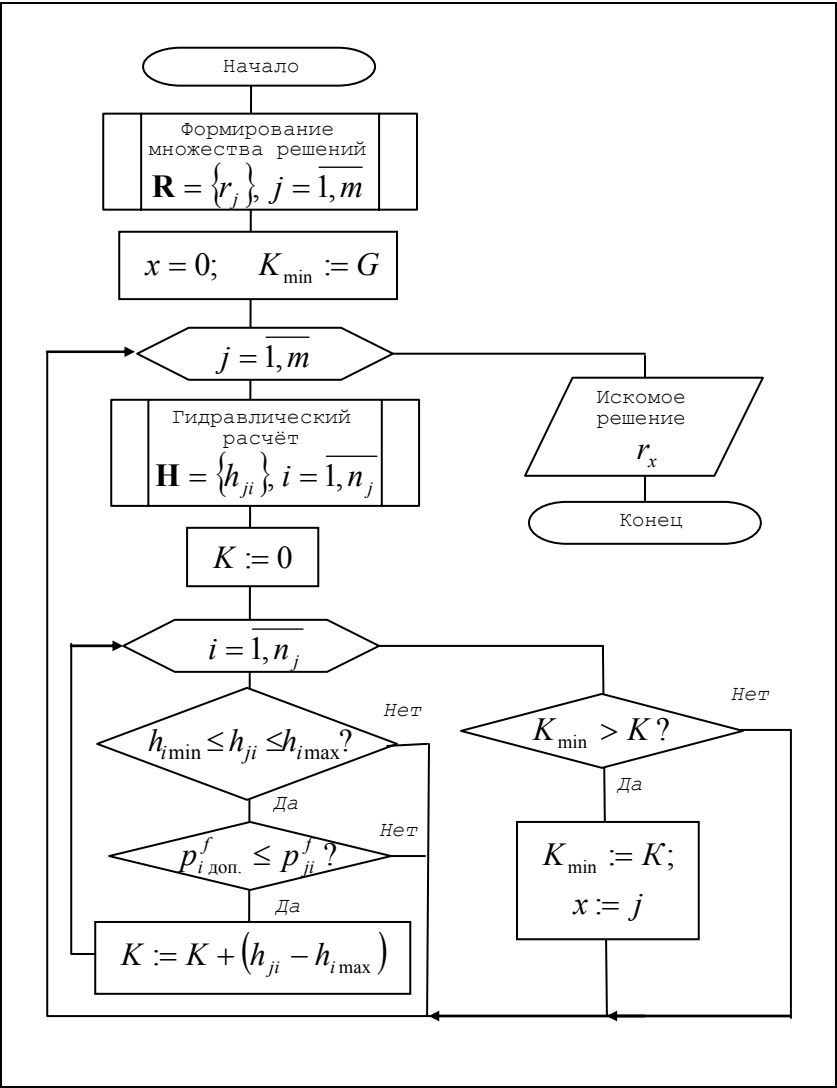


Рис.1.11 – Схема алгоритма принятия решения



та со значением, намного превосходящим любое возможное значение критерия  $K$ , например,  $10^{15}$  (больше бюджета любой страны).

В схеме алгоритма в качестве критерия эффективности проектирования или эксплуатации ТТС использован показатель суммарных избыточных напоров на потребителях:

$$K_j(t) = \sum_i^{n_j} (h_i(t) - h_{i \text{ доп.}}), \quad (1.5)$$

где  $K_j(t)$  – текущее значение показателя, рассчитываемого для каждого допустимого варианта решения  $r_j$  ( $j = \overline{1, m}$ );  $h_{ji}(t)$  – текущий напор (давление) на  $i$ -м потребителе после принятия и реализации  $j$ -го варианта;  $h_{i \text{ доп.}}$  – требуемый напор на  $i$ -м потребителе.

Минимальное значение показателя определяет выбор варианта решения.

Критерий минимума суммарных избыточных напоров (1.5) наиболее часто используется для оценки эффективности проектируемых и действующих ТТС. Вместо показателя (1.5) при незначительных модификациях схемы алгоритма могут быть использованы другие критерии эффективности, приведенные в [16, 20]. При этом анализ условий

$$p_{ji}^f(t) \geq p_{i \text{ доп.}}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (1.6)$$

не допускающих выхода системы из области безопасного функционирования, должен присутствовать всегда.

Если в результате работы алгоритма, получим  $x = 0$ , то это свидетельствует об отсутствии приемлемого решения. В данном случае следует либо заново сформировать множество альтернативных решений  $\mathbf{R}$ , либо понизить требования к принимаемому

решению, а именно, уменьшить  $h_{i \min}$  или  $p_{i \text{доп}}^f$ , либо увеличить  $h_{i \max}$ .

Следует заметить, что нет принципиальной разницы в последовательности проведения процедуры гидравлического расчёта и процедуры анализа условий (1.6) для  $j$ -го варианта. Рекомендуется использовать алгоритм, приведенный на рис.1.11, если время выполнения процедуры гидравлического расчёта меньше времени выполнения процедура анализа (1.6). В противном случае алгоритм следует модифицировать, изменив порядок проведения процедур.

Таким образом, предлагаемый подход эксплуатации и развития трубопроводной транспортной системы отличается от существующего дополнительными требованиями, которые заключаются в необходимости *контроля, учёта и обеспечения количественных показателей надёжности* на всех этапах эволюции ТТС. Естественно, такой подход требует наличие инженерной методики расчёта величин  $p_{ji}^f$ , необходимых для проведения анализа условий (1.6).

## 1.8. Задачи исследования

Предлагаемый подход к проектированию и эксплуатации ТТС реализуем только при наличии методики инженерного расчета функциональной надёжности системы относительно каждого потребителя, т.е. надёжности поставки целевого продукта каждому потребителю

$$p_{ji}^f(t), \quad j = \overline{1, m}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (1.7)$$

Методы расчета надёжности трубопроводных сетей связаны с задачей определения времени, в течение которого трубопроводная сеть находится в исправном состоянии, состоянии с одним отключенным участком, двумя и т.д. Данная задача достаточно подробно изучена, и известны расчетные формулы для определения этих величин. Также имеется возможность рассчитать от-

носительное время нахождения участка в отключенном состоянии. Тем не менее, эту информацию нельзя считать полной, поскольку она не позволяет определить *текущую функциональную надежность* (1.7).

При *конкретной* конфигурации сети действующих ТТС для расчета величин (1.7) теоретически можно воспользоваться методами статистики, что требует достаточно больших временных затрат для набора самой статистики. Однако даже для действующих ТТС практически обеспечить такой расчет для *произвольной* конфигурации невозможно из-за астрономического числа вариантов структур сети  $N = 2^z$ , где  $z$  – суммарное количество единиц запорной арматуры в сети. Для действующих ТТС величина  $z$  может представлять трехзначное число. Для сравнения:  $2^{100} \approx 10^{30}$ . Для проектируемых ТТС статистические методы оценки функциональной надёжности вообще неприемлемы.

Настоящее исследование, в первую очередь, направлено на разработку формальных методов определения функциональной надёжности (1.7) для принятия оперативных решений в процессе проектирования и эксплуатации ТТС в реальном масштабе времени или соизмеримым с таковым.

Для реализации нового подхода к эксплуатации и развитию ТТС, а также достижения цели исследования (см. разд.1.5), необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить сравнительный анализ существующих методов расчета надежности функционирования ТТС с целью выявления таких подходов к оценке надежности системы, которые учитывали бы показатели, отражающие обеспеченность потребителей целевым продуктом в течение определённого периода времени.

2. Разработать метод определения относительного времени (в процентном выражении), в течение которого потребитель распределительных трубопроводных систем получает целевой продукт в зависимости от структуры сети и надежности ее отдельных элементов. Другими словами, разработать метод расчета надежности поставки целевого продукта конкретному пользователю в реально существующих или проектируемых коммунальных трубопроводных сетях.

3. Обобщить разработанный метод на магистральные трубопроводные системы.

4. Продемонстрировать целесообразность и эффективность применения разработанного метода расчёта функциональной надёжности при анализе различных конструкций магистральных трубопроводов.

5. Определить направления дальнейшего развития теории функциональной надёжности трубопроводных транспортных систем.

Приведенный перечень является содержательной постановкой задач настоящего исследования. Решение этих задач позволит осуществить новый подход к проектированию и эксплуатации ТТС за счёт учёта функциональной надёжности на всех этапах развития систем.

## РАЗДЕЛ 2

### МЕТОДЫ ОЦЕНКИ НАДЁЖНОСТИ ТРУБОПРОВОДНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

В предыдущем разделе была дана общая характеристика проблемы надёжности для напорных трубопроводных транспортных систем. Рассмотрим теперь основные подходы к оценке надёжности таких систем.

#### 2.1. Общая характеристика методов и показателей надёжности трубопроводных систем

Напорные трубопроводные транспортные системы являются сложными инженерными объектами, состояние которых в процессе функционирования, как правило, отличается от проектных вследствие:

- переменного характера потребления целевого продукта;
- дальнейшего развития трубопроводной сети с изменением её структуры и параметров отдельных участков;
- нарастающих темпов износа и старения всех конструктивных элементов системы;
- ограниченности финансовых ресурсов на восстановление и модернизацию инженерных систем;
- отсутствия нормативно закреплённых методов оценки надёжности трубопроводных транспортных систем сложной топологии и большой размерности.

Неопределённость состояния приводит к снижению надёжности существующих трубопроводных транспортных систем, нарушает бесперебойность снабжения ЦП потребителей, а в условиях

дефицита ЦП не позволяет решить задачу его рационального распределения.

Ю.А.Ильиным, А.А.Иониным, Е.М.Гальпериным [11, 18-19, 21-22] предлагаются самые разные показатели, служащие для оценки надежности. К ним можно отнести:

- *относительные показатели*, отражающие время пребывания системы в исправном состоянии, состоянии с одним, двумя отключенными участками;
- *вероятностные показатели* надежности, характеризующие надежность сети в целом, надежность отдельных участков или фрагментов сети, вероятность получения продукта каждым отдельным потребителем.

Задача определения времени нахождения сети в исправном состоянии вызывает повышенный интерес у проектировщиков и эксплуатационников трубопроводных транспортных систем. Связано это с тем, что относительное время нахождения транспортной сети в исправном состоянии, помимо своего основного назначения, служит еще для расчета других показателей, характеризующих различные эксплуатационные качества сети. Но самое главное – расчет времени нахождения сети в исправном состоянии для несложных систем линейно зависит от общей протяженности трубопроводов сети, то есть над исследователями и инженерами-практиками не тяготеет «проклятие большой размерности» сети. Поэтому в последнее время задаче определения времени нахождения сети в исправном состоянии, состоянии с одним отключенным участком, двумя и т.д. посвящается все больше работ [11, 36] с описанием методик оценивания этих величин.

Существующие подходы к решению задач анализа технической надежности ТТС базируются на применении прямых и косвенных методов расчета надежности (рис.2.1).

Применение *прямых методов*, основанных на обработке данных эксплуатации или статистических испытаний об отказах системы, для оценки показателей надежности ТТС и ее подсистем (источника ЦП и трубопроводной сети) из-за их специфики ограничено. Основная причина заключается в том, что статистическая информация, получаемая в процессе эксплуатации одной систе-

мы, обычно не может быть обобщена на другие системы. Даже в рамках одной системы получение совокупной информации о подсистемах одной ТТС затруднено в силу уникальности самих подсистем и различных режимов их функционирования. К тому же прямые методы не решают задачу оценки надёжности при произвольном изменении структуры сети или при проектировании новой сети.

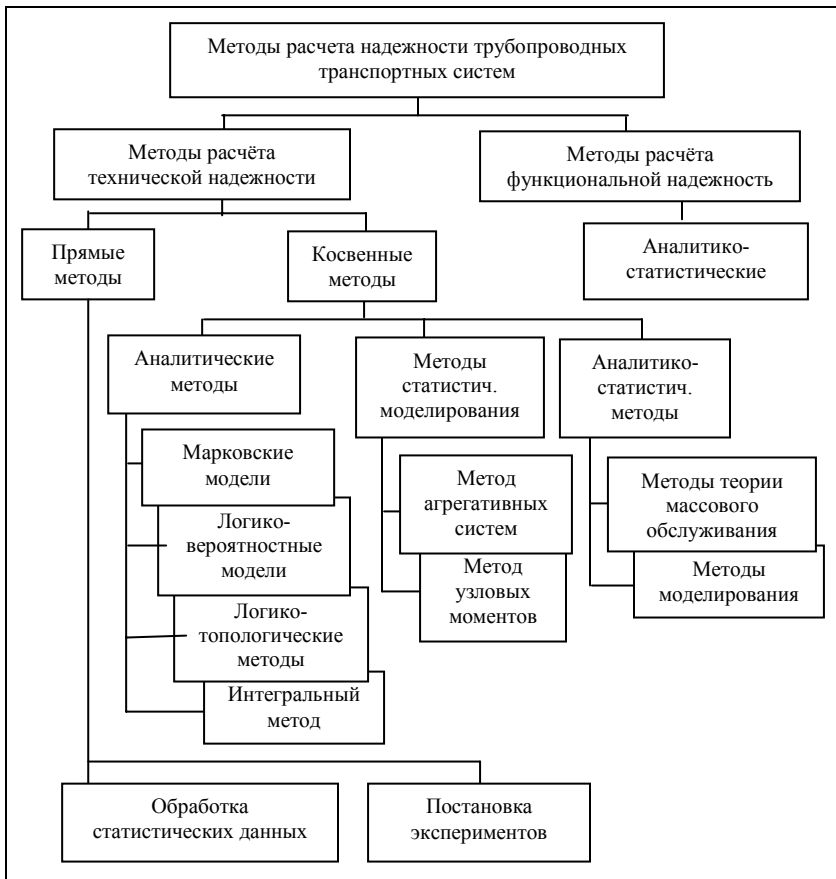


Рис.2.1 – Классификация методов расчёта надёжности трубопроводных транспортных систем

Основными для решения задач анализа надежности ТТС являются *косвенные методы*, предполагающие расчет показателей надежности сложного объекта по характеристикам надежности его элементов. В области ТТС могут применяться три класса косвенных методов:

- аналитические,
- статистического моделирования,
- аналитико-статистические.

Аналитические методы [30, 32, 46] обеспечивают высокую точность расчетов и позволяют исследовать зависимости значений показателей надежности от различных влияющих факторов и условий функционирования в любых интервалах времени. При этом процесс функционирования системы сводится обычно к модели полумарковского или многомерного марковского процесса [12]. Основными *аналитическими методами* для расчета показателей надежности ТТС являются: прямое вычисление вероятностей (включая логико-вероятностные методы), дифференциальный и интегральный методы [46], интерпретированные к анализу надежности систем.

Возможности аналитических методов, как правило, ограничены сложностью математического описания системы (особенно при законах распределения наработки на отказ и времени восстановления, отличных от экспоненциальных). Дополнительные ограничения возникают в связи с необходимостью априорного выделения существенных факторов, влияющих на надёжность и включаемых в математическую модель.

Аналитические методы расчета надежности ТТС включают:

- методы, основанные на использовании марковских и полумарковских моделей;
- логико-вероятностные методы;
- логико-топологические методы.

*Марковские модели* оценки надежности основываются на аппарате дискретных марковских процессов с непрерывным временем. Теоретические вопросы использования таких моделей для оценки надежности технических систем достаточно подробно



освещены в работах А.И.Клемина, Ю.Н.Руденко [24, 30, 48]. Область применения этих моделей при анализе надёжности ТТС ограничивается требованием на закон распределения времени наработки на отказ и времени восстановления элементов, который в данном случае должен быть исключительно экспоненциальным.

*Полумарковские модели* [27] предусматривают решение систем интегральных и алгебраических уравнений, описывающих процесс функционирования ТТС как сложной системы и записанных с использованием переходных вероятностей. Для их решения применяются прямое и обратное операционные преобразования Лапласа и Лапласа-Карсона в сочетании с итерационными методами [31].

Существенными преимуществами полумарковских моделей являются: возможность получения компактных приближенных аналитических зависимостей для расчета показателей надёжности, удобство применения численных методов и компьютерной обработки, малое время счета. К их недостаткам можно отнести трудность обоснования ряда допущений, связанных с декомпозицией структуры ТТС, а также быстрое возрастание сложности анализа при дальнейшей детализации структур.

К *логико-вероятностным методам* (ЛВМ) относятся методы [40,41], в которых математические модели надёжности элементов и системы описываются с помощью алгебры логики, а показатели надёжности – теоремами теории вероятностей, причем и то, и другое осуществляется в неявной форме.

Основными достоинствами логико-вероятностных методов являются: четкость, однозначность и высокая степень формализации при описании объекта исследования; выполнение расчета и анализа надёжности на единой методической основе.

Расчет надёжности с помощью логико-вероятностных методов состоит из двух этапов. Цель первого – переход от словесного описания процесса функционирования системы к формализованному описанию. Цель второго – количественный учет в формальном описании показателей надёжности системы в целом и показателей надёжности отдельных её элементов.

Приближенным логико-вероятностным методом могут считаться *таблицы готовых решений*, которые рекомендуются для решений локальных задач анализа надежности, но также могут быть использованы для приближенного анализа крупных систем.

Недостатком данного метода является необходимость вербального описания процесса функционирования системы на первом этапе и его замены на формальное описание, что делает метод мало эффективным при оперативном расчёте надёжности системы, связанного с изменением её структуры.

К *логико-топологическим методам* (ЛТМ) относятся методы [28], в которых математические модели надежности элементов и системы описываются, как и в ЛВМ, с помощью алгебры логики, а на втором этапе, при нахождении показателей надежности систем, используются аналитические выражения, полученные с помощью специализированных *топологических методов*. Для топологических методов характерно представление условий функционирования системы в виде графа состояний. При этом показатели надежности вычисляются без составления и решения систем уравнений, а с помощью различного рода аналитических выражений и мнемонических правил. Достоинством логико-топологических методов является непосредственное нахождение показателей надежности по логическим функциям, без вычисления вероятностей работоспособного и неработоспособного состояний системы. К недостаткам этих методов можно отнести громоздкость вычислений при нахождении точного решения, так как расчет фактически выполняется не на основе вычисления логических функций, а по сложным моделям, описывающим возможные состояния системы.

Для ЛВМ и ЛТМ на любом из двух этапов расчёта имеет место как выполнение точных, так и приближенных действий с оценкой знака и значения погрешности.

Методы *статистического моделирования* [3, 25], базирующиеся на том, что вероятность случайного события можно оценить частотой его наступления за достаточно длительное время функционирования, свободны от ограничений на сложность объекта и вид функций распределения случайных величин. Эти методы позволяют учитывать индивидуальные свойства объектов,

условия их эксплуатации и т.д. Их основным недостатком являются чрезмерные затраты времени при оценке надёжности систем с большим числом элементов, при исследовании зависимостей показателей надёжности от влияющих факторов, а также при анализе высоконадёжных систем. Методы статистического моделирования, как и прямые методы, не решает задачи оценки надёжности при произвольном изменении структуры трубопроводной сети. В связи с этим применение методов статистического моделирования в настоящее время более эффективно при исследовании надёжности источника ЦП, которые имеют по сравнению с распределительной сетью намного меньше структурных элементов.

*Аналитико-статистические методы* [25, 26, 32] – наиболее перспективное направление в исследовании надёжности как ТТС в целом, так и ее отдельных подсистем. Объясняется это тем, что, с одной стороны, данные методы за счёт своей аналитической части позволяют ускорить процесс оценки, а за счёт статистической – увеличить её адекватность.

Как было сказано ранее, известные косвенные методы расчета надёжности, применимые к ТТС, можно классифицировать по используемому математическому аппарату на аналитические, статистического моделирования и аналитико-статистические методы. Кроме того, все методы можно разделить по подходу к воспроизведению свойств объекта при оценке его надёжности на:

- методы, учитывающие его отдельные случайные состояния и позволяющие определить частоты отказов и время восстановления;
- методы, учитывающие случайные процессы функционирования объекта и позволяющие определять функции распределения продолжительности любых его состояний.

Рассмотренные методы в их существующем виде в большей степени применимы для расчетов надёжности трубопроводных сетей в магистральных транспортных системах. Для расчетов же распределительных сетей они должны быть модифицированы таким образом, чтобы позволяли выполнять расчет для объектов большой размерности.

Таким образом, анализ существующих методов расчёта надёжности трубопроводных транспортных систем позволяет сделать следующие выводы:

- статистические методы, которые обеспечивают наиболее адекватные оценки технической и функциональной надёжности независимо от сложности и размерности сетей, требуют слишком больших временных затрат для, не могут оценить надёжность в зависимости от сложности структуры сети и непригодны для проектирования новых сетей;
- аналитические методы, которые способны определять показатели надёжности в зависимости от структуры сети, не обеспечивают должной адекватности и практически непригодны для оценки надёжности сетей большой размерности;
- аналитико-статистические методы, которые считаются наиболее перспективными для оценки показателей надёжности, требуют дальнейшего совершенствования и развития с целью их применения для распределительных сетей большой размерности и сложности.

Сделанные выводы выдвигают потребность в новом методе, который в отличие от существующих позволял бы осуществлять расчёты функциональной надёжности больших и сложных трубопроводных сетей. Метод должен быть способным вести расчёты как для сетей, которые только проектируются, так и для сетей, которые находятся в эксплуатации или реконструируются. Кроме того, новый метод должен быть достаточно оперативным, чтобы диспетчерские службы могли вычислять и анализировать изменения функциональной надёжности при изменении структуры или эксплуатационных режимов сетей, т.е. метод должен работать в реальном масштабе времени.

Приведенные требования являются основными ориентирами для исследователей, которые стараются усовершенствовать существующие или разработать новые методы расчёта функциональной надёжности сложных сетей. Именно этими требованиями руководствовались авторы в своих исследованиях, направленных на разработку универсального метода вычисления функциональной надёжности.

## **2.2. Анализ факторов неопределенности в процессах эксплуатации трубопроводных систем**

Эксплуатация ТТС является сложной технической и организационной задачей. При этом проблемы, связанные с масштабом и технической сложностью систем, наличием разнообразных требований к ним, дополняются проблемами неопределенности поведения и состояния системы в результате влияния случайных возмущений, дефицита информации и участия человека в управлении.

К случайным возмущениям, воздействующим на систему, следует отнести:

- *технические* (аварийные отказы запорной арматуры, оборудования насосных и компрессорных станций, повреждение труб и др.);
- *технологические* (износ участков сети с последующим его выводом из функционирующей системы для проведения ремонтно-восстановительных работ; ввод в эксплуатацию участка, находившегося в ремонте или на профилактике; изменение режимов потребления и подачи ЦП);
- *метеорологические и геологические* (температура, давление и влажность атмосферного воздуха, скорость ветра, температура грунта, смещение пластов грунта).

Причинами наличия дефицита информации могут стать:

- отказы датчиков;
- сбои в системах сбора и обработки информации;
- недостаточная частота или точность получаемых результатов измерений;
- отсутствие датчиков в необходимых местах;
- невозможность передачи данных о состоянии и параметрах системы в центр принятия управляющих решений.

Участие человека в управлении как лица, принимающего решение (ЛПР), определяет ряд дополнительных проблем:

- субъективный характер формулировки целей управления;

- субъективность принятия решения о выдаче управляющих воздействий;
- различный профессиональный уровень ЛПР;
- объективная сложность учета всех факторов неопределенности и совокупности технологических ограничений на режимы работы оборудования.

Все вышеперечисленные случайные воздействия на ТТС и причины дефицита информации определяют следующие характерные для системы типы неопределенности:

- неопределенность модели объекта управления, проявляющаяся в её неадекватности и неточности информации о фактических значениях параметров этой модели;
- неопределенность состояния системы, проявляющаяся в неполноте и недостоверности информации о параметрах текущего режима работы;
- неопределенность среды, в которой функционирует система, проявляющаяся в изменении процессов потребления и подачи ЦП, а также случайном характере метеоусловий;
- неопределенность цели управления, проявляющаяся в неоднозначности формализации обобщающего критерия и множества частных показателей качества и эффективности функционирования системы.

Задача рациональной эксплуатации и развития ТТС в широком смысле заключается в согласовании текущего состояния и тенденций развития среды с текущим состоянием и развитием объекта исследования. Неполнота и недостоверность информации о текущих и будущих состояниях среды и объекта неизбежно приводит к ошибкам в их оценке, а, следовательно, и к ошибкам в расчете надежности системы. Поэтому на этапе проектирования и реконструкции ТТС важен учет если не всех, то хотя бы основных факторов неопределенности условий функционирования ТТС.

Рассматривая действующую трубопроводную сеть с учетом вышеизложенных факторов неопределенности, целесообразно составить представление о её возможных состояниях в процессе функционирования, а также о характере переходов системы из

одного состояния в другое. При этом будем стараться связывать различные состояния системы с её структурой. Тем более что выход из строя любого элемента и вывод его из состава системы непосредственно влечет за собой изменение структуры функционирующей части системы.

### 2.3. Анализ потоков отказа и восстановления в трубопроводных транспортных системах

Как отмечалось, причинами перехода сети из одного состояния в другое являются внешние и внутренние воздействия, вызванные техническими неисправностями, изменением уровня потребления транспортируемого продукта и подобными им событиями, которые носят стохастический характер. Возможные состояния системы наглядно изображаются с помощью так называемого графа состояний (рис. 2.2), на котором состояния системы отображены прямоугольниками, а возможные переходы системы из состояния в состояние – стрелками, соединяющими соответствующие прямоугольники.

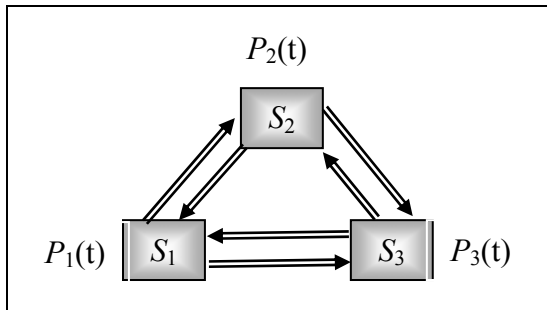


Рис.2.2 – Граф состояний системы, имеющей три возможных состояния

Для описания случайного процесса, протекающего в системе с дискретными состояниями  $S_1, S_2, \dots, S_n$ , используют *вероятности состояний*

$$P_1(t), P_2(t), \dots, P_n(t), \quad (2.1)$$

где  $P_k(t)$  – вероятность того, что в момент времени  $t$  система находится в состоянии  $C_k$ .

Вероятности  $P_k(t)$  удовлетворяют условию

$$\sum_{k=1}^n P_k(t) = 1. \quad (2.2)$$

Случайный процесс, протекающий в системе, является процессом с дискретным временем, если переходы системы из состояния в состояние возможны только в определенные моменты времени  $t_1, t_2, \dots$ . Для процесса с непрерывным временем характерны переходы системы из состояния в состояние в любой момент времени.

Если в системе с дискретными состояниями происходит случайный процесс с непрерывным временем, то переходы системы из состояния в состояние можно рассматривать как происходящие под влиянием некоторых потоков событий. Случайный процесс с дискретными состояниями является *марковским*, если все вероятностные характеристики процесса в будущем зависят лишь от того, в каком состоянии этот процесс находится в настоящий момент времени, и не зависят от того, каким образом этот процесс протекал в прошлом («будущее зависит от прошлого только через настоящее»). Если процесс марковский, то все потоки событий, переводящие систему из состояния в состояние, являются пуассоновскими.

Последовательность событий, происходящих друг за другом в случайные моменты времени, образует поток событий [6]. Важным свойством потока событий является его интенсивность – среднее число событий, происходящих за единицу времени. При функционировании трубопроводной сети на нее воздействуют два потока событий: поток отказов с интенсивностью  $\lambda$  и поток восстановления с интенсивностью  $\mu$ . Поток отказов является



следствием аварий сети, происходящих в произвольные промежутки времени. Поток восстановления является следствием работы ремонтных бригад.

Для моделирования процесса отказов и восстановления в трубопроводной сети достаточно знания величин  $\lambda$  и  $\mu$ .

Пребывание сети в различных возможных состояниях может быть описано при помощи математического аппарата марковских случайных процессов с непрерывным временем при условии, что потоки отказов и восстановления в напорных трубопроводных системах являются простейшими потоками событий. Для выполнения данного условия потоки отказов и восстановления должны обладать тремя свойствами: стационарностью, ординарностью и отсутствием последствия. Такие потоки принято называть пуассоновскими [6].

Анализ потоков отказа и восстановления в ТТС показывает, что они обладают всеми тремя обязательными свойствами простейших потоков событий.

Так, стационарным потоком событий называют поток, для которого вероятность попадания определенного числа событий на заданный временной участок зависит только от длины участка  $T$  и не зависит от того, где на временной оси  $t$  расположен этот участок. Если некоторые временные интервалы  $T_1$  и  $T_2$ , находящиеся на временной оси  $t$  в разных местах, равны между собой, то равны и вероятности появления определенного числа событий  $m$  в течение этих интервалов времени  $P_1(X=m)$  и  $P_2(X=m)$ :

$$T_1 = T_2 \Rightarrow P_1(X=m) = P_2(X=m).$$

Здесь  $X$  – случайная величина, обозначающая число появления события за определённый период времени  $T$ .

Статистические сведения о поведении различных трубопроводных сетей говорят о том, что интенсивность потоков отказов в них  $\lambda$  практически не зависит от времени. Безусловно, по мере износа и старения трубопроводных систем интенсивность отказов медленно растёт по экспоненциальному закону. Поэтому через определенные периоды времени (после каждого сезона) её жела-

тельно корректировать. Однако в течение периодов времени, не превышающих сезонный отрезок времени, интенсивность отказов можно считать постоянной величиной. Что касается интенсивности восстановления, то она ещё меньше подвержена временным изменениям. Более того, интенсивность в большей мере зависит от квалификации ремонтных бригад. А поскольку состав бригад постоянно обновляется (неопытные молодые рабочие вливаются в бригады, а опытные рабочие покидают их), то временные колебания квалификации ремонтной бригады незначительны, и интенсивность восстановления  $\mu$  также можно считать постоянной величиной. Таким образом, можно оба потока считать стационарными.

Ординарным называют поток событий, для которого вероятность попадания двух и более событий на бесконечно малый участок  $\Delta t$  несоизмеримо мала по сравнению с вероятностью попадания одного события на этот участок. Другими словами, два и более отказа или восстановления за бесконечно малый промежуток времени произойти не могут, т.е. имеет место предел

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P\{X > 1\}}{P(X = 1)} = 0.$$

Как показывает опыт, для трубопроводных сетей одновременное возникновение двух, а тем более, нескольких аварийных ситуаций или отказов маловероятно. Можно считать, что потоки отказов в реальной трубопроводной сети обладают свойством ординарности. То же самое следует сказать о потоке восстановления: время проведения восстановительных работ намного больше времени, необходимого на ввод в эксплуатацию восстановленного участка. Кроме того, ввод нескольких восстановленных участков отрабатывается последовательно. Наличие свойства ординарности у потоков отказа и восстановления отмечается в работе Абрамова [2]. Исследования действующих трубопроводных сетей показывают, что вероятность двух и более отказов одновременно практически равна нулю. В некоторых случаях эффективность функционирования трубопроводной сети проверяется при выключении лишь одного участка [1]. Таким образом,

потоки отказов и восстановления сети можно считать ординарными.

Для потока событий без последействия характерно отсутствие зависимости вероятности попадания определенного числа событий на временной участок длиной  $T$  от числа событий, попадающих на любой другой участок, не пересекающийся с первым. Данное свойство означает, что одно событие не влечет за собой другое событие, т.е. отказ одного из трубопроводов не может повлечь за собой отказы других участков, а восстановление одного участка никоим образом не влияет на восстановление другого. В реальных трубопроводных сетях не исключено, что аварийная ситуация на одном участке трубопроводной сети может повлечь за собой аварии на других участках сети. Такие случаи действительно наблюдаются, однако по имеющимся сведениям [2, 14, 19] подобные ситуации наблюдаются достаточно редко и в работе они не рассматриваются. Поэтому можно утверждать, что поток отказов обладает свойством отсутствия последействия.

Таким образом, потоки отказов и восстановления в трубопроводных сетях обладают всеми тремя свойствами, присущими для простейших потоков событий. Данное обстоятельство позволяет потоки отказов и восстановления считать пуассоновскими и, следовательно, использовать для их исследования аппарат марковских случайных процессов.

## **2.4. Трубопроводная транспортная система как система массового обслуживания**

Для получения математической модели функционирования трубопроводной сети и графической интерпретации состояний сети воспользуемся её представлением в форме размеченного графа, как было показано на рис.2.2. Для ТТС с пуассоновскими потоками отказа и восстановления размеченный граф трансформируется в марковскую цепь в виде «схемы гибели и размножения», как это принято в «Теории систем массового обслуживания». Таким образом, ТТС с её отказами и ремонтами трубопроводов рассматривается как система массового обслуживания (СМО).

Цепь Маркова представляет собой размеченный граф состояний, т.е. ориентированный граф в виде цепочки прямоугольных блоков (вершин), соединенных направленными дугами.

Вершина графа интерпретируется как одно из возможных состояний системы. Состояние системы массового обслуживания будем связывать с вероятностью числа требований на ремонт трубопроводов, находящихся в системе:

- вероятность состояния  $P_0$  – в системе нет ни одного требования, все трубопроводы функционируют;
- вероятность состояния  $P_1$  – в системе находится одно требование, один трубопровод отключен от системы;
- вероятность состояния  $P_2$  – в системе находится два требования, два трубопровода отключены от системы;

• • •

- вероятность состояния  $P_m$  – в системе находится  $m$  требований, все трубопроводы неработоспособны и отключены от системы.

Цепочечный вид графа обусловлен ординарностью потоков требований. Число требований в каждый момент времени может увеличиваться или уменьшаться только на единицу.

Дуги графа интерпретируются как процессы перехода из одного состояния в другое. Переходы, вызванные отказом участков, называют прямыми, а переходы, вызванные восстановлением участков – обратными.

Прямые переходы будем связывать с интенсивностью появления требований на ремонт трубопровода в системе; обратные – с интенсивностью удовлетворения требований. Будем считать, что поток входящих требований и поток удовлетворенных требований являются простейшими потоками событий, поскольку порождающие их потоки отказов и восстановления являются пуассоновскими. При этом имеет место приемлемость интенсивностей, т.е. интенсивность потоков поступления требований и их удовлетворения соответственно равны  $\lambda$  и  $\mu$ .

Интенсивность поступления требований  $\lambda$  численно равна величине, обратной средней продолжительности работы отдельного участка сети (трубопровода) до наступления отказа (среднее время наработки на отказ).

Интенсивность удовлетворения требований  $\mu$  численно равна величине, обратной продолжительности ремонта, т.е. периода времени от момента исключения участка сети (трубопровода) из числа функционирующих до момента его ввода в эксплуатацию после ремонта.

В зависимости от числа ремонтных бригад будем различать одноканальную СМО и многоканальную СМО. Под каналом будем понимать ремонтную бригаду со всеми машинами, механизмами и материалами, способную в автономном режиме устранять повреждения на трубопроводе. При этом каждый канал в любой момент времени может обслуживать только одно требование.

Поскольку источник требований на ремонт трубопроводов находится внутри системы в результате её функционирования, то соответствующая СМО является замкнутой системой с максимальным числом требований  $m$ , равным числу трубопроводов.

Марковская цепь для трубопроводной сети, содержащей  $m$  участков (трубопроводов), содержит  $(m + 1)$  вершину.

На рис.2.3 и 2.4 показаны марковские цепи для одноканальной и многоканальной СМО соответственно. Цепи позволяют построить математические модели расчёта вероятности нахождения системы в том или ином состоянии.

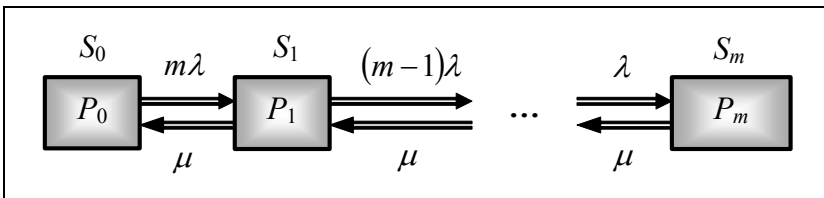


Рис.2.3 – Замкнутая одноканальная система массового обслуживания с ограниченным потоком требований

Когда в одноканальную СМО (рис.2.3) поступает требование на обслуживание, то число работающих трубопроводов уменьшается на единицу. Соответственно уменьшается интенсивность поступления нового требования.

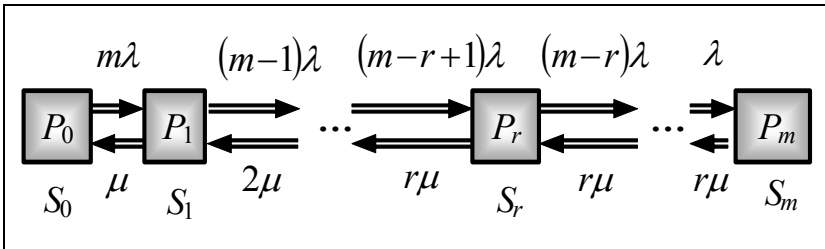


Рис.2.4 – Замкнутая многоканальная система массового обслуживания с ограниченным потоком требований

Многоканальная СМО (рис.2.4) с числом каналов  $r$  может одновременно обслуживать от 0 до  $r$  требований. В отличие от одноканальной в  $r$ -канальной системе очередь на обслуживание образовывается только тогда, когда система находится в состоянии  $P_r$  (все каналы заняты), и при этом новое требование поступает в систему раньше, чем освободится какой-нибудь из занятых каналов.

Когда все каналы заняты (состояние  $P_r$ ) или очередь не пустая (состояние  $P_i$ ,  $r < i \leq m$ ), интенсивность обслуживания является величиной постоянной и равной  $r\mu$ .

В качестве примера приведём построение марковской цепочки для ТТС, распределительная сеть которой имеет 4 трубопровода каждый длиной 1 км и средними интенсивностями отказа и восстановления  $\lambda$  и  $\mu$ , а подсистема вспомогательного производства имеет 2 ремонтные бригады (рис.2.5).

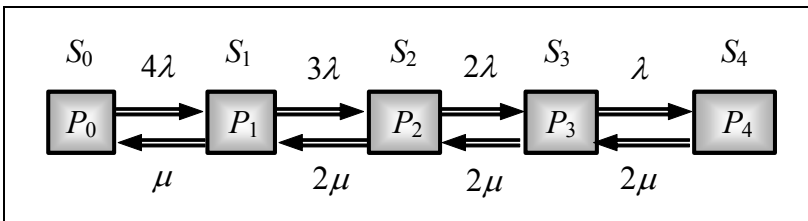


Рис.2.5 – Марковская цепь для двухканальной СМО с четырьмя обслуживаемыми объектами

Система может находиться в пяти состояниях:

- $S_0$  – все трубопроводы исправны с вероятностью  $P_0$ ;
- $S_1$  – один трубопровод неисправный с вероятностью  $P_1$ ;
- $S_2$  – два трубопровода неисправны с вероятностью  $P_2$ ;
- $S_3$  – три трубопровода неисправны с вероятностью  $P_3$ ;
- $S_4$  – все трубопроводы неисправны с вероятностью  $P_4$ .

Построенная таким образом марковская цепь позволяет сформировать математическую модель функционирования сети, которая может быть представлена системой уравнений Колмогорова:

$$\begin{cases} \frac{dP_0}{dt} = -4\lambda P_0(t) + \mu P_1(t) - (\lambda_1 + \lambda_2)P_0(t), \\ \frac{dP_1}{dt} = 4\lambda P_0(t) - (\mu + 3\lambda)P_1(t) + 2\mu P_2(t), \\ \frac{dP_2}{dt} = 3\lambda P_1(t) - (2\mu + 2\lambda)P_2(t) + 2\mu P_3(t), \\ \frac{dP_3}{dt} = 2\lambda P_2(t) - (2\mu + \lambda)P_3(t) + 2\mu P_4(t), \\ \frac{dP_4}{dt} = \lambda P_3(t) - 2\mu P_4(t), \end{cases} \quad (2.3)$$

где  $P_i$  – вероятность нахождения СМО в  $i$ -м состоянии,  $i = \overline{0,4}$ .

Уравнения Колмогорова являются дифференциальными уравнениями для СМО с однородными элементами, в которых неизвестными функциями являются вероятности состояний. Решая систему (2.3) относительно этих неизвестных, мы получим только оценку искомых функций, поскольку в общем случае трубопроводная сеть состоит из неоднородных трубопроводов разной длины, диаметра, толщины стенок и материала изготовления. В связи с этим интенсивности и отказов, и восстановления для разных трубопроводов будут различны. Чтобы каким-то образом

приблизить СМО к однородной системе, прибегают к принудительному усреднению интенсивности. В нашем случае усреднение было задано условием задачи.

При допущении о стационарности режимов работы системы (вероятности состояний не зависят от времени) система уравнения Колмогорова (2.3) принимает вид системы алгебраических уравнений, в которых неизвестными уже являются так называемые финальные вероятности состояний:

$$\begin{cases} -4\lambda P_0 + \mu P_1 = 0, \\ 4\lambda P_0 - (\mu + 3\lambda)P_1 + 2\mu P_2 = 0, \\ 3\lambda P_1 - (2\mu + 2\lambda)P_2 + 2\mu P_3 = 0, \\ 2\lambda P_2 - (2\mu + \lambda)P_3 + 2\mu P_4 = 0, \\ \lambda P_3 - 2\mu P_4 = 0. \end{cases} \quad (2.4)$$

Решение полученной системы позволяет определить неизвестные вероятности состояний  $P_i$ , которые интерпретируются как время (в процентном отношении), в течение которого система полностью исправна ( $P_0$ ); имеет один ( $P_1$ ); два ( $P_2$ ); три ( $P_3$ ) или четыре поврежденных участка ( $P_4$ ).

Для большинства ТТС допущение о стационарности режимов работы систем вполне правомерно. Поэтому для получения математических моделей систем целесообразно использовать уравнения Колмогорова в виде (2.4).

Решение системы уравнений Колмогорова в форме (2.4) в случае, когда СМО имеет один канал обслуживания (одна ремонтная бригада) и  $m$  участков (трубопроводов), даёт следующие расчётные формулы для искомых вероятностей состояний:

– вероятность пребывания в системе 1-го требования

$$P_1 = m\rho P_0, \quad (2.5)$$



где  $P_0$  – вероятность отсутствия требований в системе;  $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$  –

коэффициент загрузки;

– вероятность одновременного пребывания в системе 2-х требований

$$P_2 = (m-1)\rho P_1 = m(m-1)\rho^2 P_0; \quad (2.6)$$

– вероятность одновременного пребывания в системе 3-х требований

$$P_3 = (m-2)\rho P_2 = m(m-1)(m-2)\rho^3 P_0; \quad (2.7)$$

...

– вероятность одновременного пребывания в системе  $i$  требований

$$\begin{aligned} P_i &= (m-(i-1))\rho P_{i-1} = m(m-1)(m-2)\cdots(m-(i-1))\rho^i P_0 = \\ &= \rho^i P_0 \prod_{j=0}^{i-1} (m-j); \end{aligned} \quad (2.8)$$

...

– вероятность одновременного пребывания в системе  $m$  требований

$$P_m = \frac{\rho}{r} P_{m-1} = \frac{m!}{r^{m-r} \cdot r!} \rho^m P_0. \quad (2.9)$$

– вероятность отсутствия требований в системе  $P_0$  (из соотношений (2.5) – (2.19) с учетом равенства  $\sum_{i=0}^m P_i = 1$ )

$$P_0 = \left( 1 + m\rho + \sum_{i=2}^m \rho^i \prod_{j=0}^{i-1} (m-j) \right)^{-1}. \quad (2.10)$$

В общем случае, когда СМО имеет  $r$  каналов и  $m$  участков (трубопроводов) решение системы уравнений Колмогорова в форме (2.4) даёт следующие расчётные формулы для искомых вероятностей состояний:

– вероятность пребывания в системе 1-го требования

$$P_1 = m\rho P_0; \quad (2.11)$$

– вероятность одновременного пребывания в системе 2-х требований

$$P_2 = (m-1) \frac{\rho}{2} P_1 = m(m-1) \frac{\rho^2}{2!} P_0; \quad (2.12)$$

– вероятность одновременного пребывания в системе 3-х требований

$$P_3 = (m-2) \frac{\rho}{3} P_2 = m(m-1)(m-2) \frac{\rho^3}{3!} P_0; \quad (2.13)$$

...

– вероятность одновременного пребывания в системе  $i$  требований

$$\begin{aligned} P_i &= (m-(i-1)) \frac{\rho}{i} P_{i-1} = m(m-1)(m-2) \cdots (m-(i-1)) \frac{\rho^i}{i!} P_0 = \\ &= \frac{\rho^i}{i!} P_0 \prod_{j=0}^{i-1} (m-j), \quad 1 \leq i \leq r; \end{aligned} \quad (2.14)$$

...

– вероятность одновременного пребывания в системе  $r$  тре-

бований

$$\begin{aligned} P_r &= (m - (r - 1)) \frac{\rho}{r} P_{r-1} = m(m-1)(m-2) \cdots (m - (r - 1)) \frac{\rho^r}{r!} P_0 = \\ &= \frac{\rho^r}{r!} P_0 \prod_{j=0}^{r-1} (m - j), \quad 1 \leq r \leq m; \end{aligned} \quad (2.15)$$

– вероятность одновременного пребывания в системе  $(r+1)$ -го требования

$$\begin{aligned} P_r &= (m - r) \frac{\rho}{r} P_r = m(m-1)(m-2) \cdots (m - r) \frac{\rho^r}{r \cdot r!} P_0 = \\ &= \frac{\rho^r}{r \cdot r!} P_0 \prod_{j=0}^r (m - j); \end{aligned} \quad (2.16)$$

...

– вероятность одновременного пребывания в системе  $i$  требований

$$\begin{aligned} P_i &= (m - (i - 1)) \frac{\rho}{r} P_{i-1} = m(m-1)(m-2) \cdots (m - (i - 1)) \frac{\rho^i}{r^{i-r} r!} P_0 = \\ &= \frac{\rho^i}{r^{i-r} r!} P_0 \prod_{j=0}^{i-1} (m - j), \quad (r + 1) \leq i \leq m; \end{aligned} \quad (2.17)$$

...

– вероятность одновременного пребывания в системе  $m$  требований

$$P_m = \frac{\rho}{r} P_{m-1} = \frac{m!}{r^{m-r} \cdot r!} \rho^m P_0; \quad (2.18)$$

– вероятность отсутствия требований в системе  $P_0$  (из соот-

ношений (2.11) – (2.18) с учетом равенства  $\sum_{i=0}^m P_i = 1$ )

$$P_0 = \left( 1 + \sum_{i=1}^m \frac{\rho^i}{i!} \prod_{j=0}^{i-1} (m-j) + \sum_{i=r+1}^m \frac{\rho^i}{r^{i-r} r!} \prod_{j=0}^{i-1} (m-j) \right)^{-1}. \quad (2.19)$$

Из сравнений формул (2.5) – (2.10) для замкнутой одноканальной СМО и формул (2.11) – (2.19) для замкнутой многоканальной СМО видно, что только вероятность пребывания одного требования в системе  $P_1$  рассчитывается по идентичным формулам: (2.5) и (2.11) соответственно. Вероятности пребывания двух и более требований в системе или их отсутствие вообще рассчитываются по принципиально отличным формулам.

Отметим, что соотношения (2.5) – (2.19) справедливы только для однородных стационарных СМО. При этом сложность расчётов и погрешности, связанные с усреднением параметров СМО, делают эти соотношения неэффективными при оперативной оценке надежности реальных транспортных сетей даже небольшой размерности.

Для неоднородных СМО нахождение искомых вероятностей состояний системы связано с формированием системы уравнений Колмогорова на основе размеченного сильно связанного графа, содержащего  $(m+1)$  вершину. Система Колмогорова в этом случае состоит из  $2^m$  уравнений. Даже сравнительно несложная трубопроводная сеть требует решения довольно громоздкой системы уравнений. Так, для сети из 20 участков система уравнений состоит из  $2^{20} \approx 10^6$  уравнений. Решение такой системы требует больших объемов памяти и больших временных затрат. В реальной распределительной трубопроводной сети число участков определяется величиной на порядок больше, чем 20, а соответствующая ей система Колмогорова имеет более  $10^{60}$  уравнений. Астрономические размеры системы не позволяют использовать её для оперативной оценки надежности неоднородных трубопроводных транспортных сетей высокой размерности.

## 2.5. Усредненные временные показатели нахождения трубопроводной транспортной сети в исправном и неисправном состояниях

Анализ выражений (2.5) – (2.19) показывает, что все вероятности состояний ТТС зависят от числа участков  $m$ , числа ремонтных бригад  $r$ , интенсивности отказов  $\lambda$  и интенсивности восстановления  $\mu$ .

Число ремонтных бригад  $r$ , обслуживающих водопроводную сеть, зависит от протяжённости сети. В среднем величина  $r$  определяется из расчёта: одна бригада на 50 км сети.

Интенсивность восстановления  $\mu$  характеризует способность ремонтной бригады осуществлять ремонтные работы. При одинаковом кадровом составе и техническом обеспечении ремонтных бригад величину  $\mu$  можно считать константой, т.е. не зависящей от каких-либо параметров сети.

Интенсивность восстановления  $\mu$  и число ремонтных бригад в большей степени характеризуют ремонтные службы, нежели саму распределительную трубопроводную сеть. Поэтому при рассмотрении вопросов надёжности трубопроводных сетей интерес, в первую очередь, представляют параметры  $m$  и  $\lambda$ .

Рассмотрим однородную трубопроводную сеть с суммарной длиной трубопроводов 50 км. Сеть обслуживается одной ремонтной бригадой с интенсивностью восстановления поврежденных трубопроводов  $\mu = 182,5 \text{ год}^{-1}$ , т.е. ремонт одного повреждения осуществляется в течение 2-х суток. Все трубопроводы имеют одинаковую длину (1 км) и одинаковый диаметр, изготовлены из одного материала и эксплуатируются в одинаковых условиях. При заданной длине сети число трубопроводов составит  $m = \frac{50}{l}$ .

Пусть  $\lambda_0$  – параметр потока отказов на участке трубопровода длиной 1 км в течение года (удельная интенсивность отказов). Для реально действующих трубопроводов он колеблется от 0,2

$(\text{км/год})^{-1}$  (для вновь введённых в эксплуатацию) до  $0,93 (\text{км/год})^{-1}$  (для сильно изношенных).

В табл.1.1 представлены результаты расчёта вероятности  $P_0$  (отсутствия требований в системе) и вероятностей  $P_1$ ,  $P_2$  и  $P_3$  состояний системы соответственно с 1-м, 2-мя и 3-мя требованиями в зависимости от средней длины трубопроводов  $l$  (1 км, 1,5 км, 2 км, 3 км, 4 км и 5 км) при  $\lambda_0 = 0,93 (\text{км/год})^{-1}$ . Расчетные формулы вероятностей с учётом одноканальности СМО согласно формулам (2.5) – (2.7) и (2.10) имеют следующий вид:

$$P_1 = m\rho P_0,$$

$$P_2 = (m-1)\rho P_1,$$

$$P_3 = (m-2)\rho P_2,$$

$$P_0 = \left( 1 + m\rho + \sum_{i=2}^m \rho^i \prod_{j=0}^{i-1} (m-j) \right)^{-1}.$$

Таблица 1.1

Расчётные вероятности состояний

$l$ (км)	$m$	$\lambda = \lambda_0 l$ (км/год) $^{-1}$	$\mu$ (год) $^{-1}$	$\rho = \frac{\lambda}{\mu}$	$P_0$	$P_1$	$P_2$	$P_3$
1	50	0,93	182,5	0,0051	0,7516	0,1879	0,0442	0,0054
1,5	33	1,395	182,5	0,0076	0,7516	0,1885	0,0458	0,0054
2	25	1,86	182,5	0,0102	0,7516	0,1917	0,0470	0,0054
3	17	2,79	182,5	0,0153	0,7516	0,1956	0,0508	0,0057
4	12	3,72	182,5	0,0204	0,7516	0,1840	0,0412	0,0042
5	10	4,65	182,5	0,0255	0,7516	0,1917	0,0446	0,0045

Анализ данных табл.1.1 позволяет сделать три очень важных вывода:

- во-первых, расчетные вероятности состояний  $P_0$ ,  $P_1$ ,  $P_2$  и  $P_3$  не зависят от числа трубопроводов  $m$  в сети;
- во-вторых, существенными состояниями системы являются состояния  $S_0$  (все трубопроводы исправны) и  $S_1$  (поврежден один трубопровод), поскольку вероятности  $P_2$  и  $P_3$ , состояний  $S_2$  (повреждено 2 трубопровода) и  $S_3$  (повреждено 3 трубопровода), а тем более состояний с большими индексами, настолько малы, что можно считать состояния  $S_i$  при  $i > 1$  невозможными;
- в-третьих, число аварий на одном трубопроводе в течение года определяется выражением

$$\lambda = \lambda_0 l, \quad (2.20)$$

т.е. оно пропорционально параметру потока отказов  $\lambda_0$  и длине трубопровода  $l$ .

Обе величины  $\lambda_0$  и  $l$  в (2.20) чрезвычайно важны.

Число отказов в единицу времени трубопровода единичной длины (параметр потока отказа)  $\lambda_0$  зависит от диаметра трубы и материала её изготовления. Трубы больших диаметров имеют и параметры  $\lambda_0$  с большими значениями. Трубы, изготовленные из более прочных материалов, имеют параметры  $\lambda_0$  с меньшими значениями. Чем меньше параметр  $\lambda_0$ , тем надёжнее трубопровод.

Длина  $l$  – это второй параметр трубопровода, от которого зависит его надёжность. Чем больше длина трубопровода, тем меньше его надёжность.

Построение таблицы, аналогичной табл.1.1, для произвольной распределительной трубопроводной сети требует знания

Трубопроводные транспортные системы

усредненного параметра  $\lambda_{0\text{cp}}$  и усредненной длины трубопровода  $l_{\text{cp}}$ .

Усредненная интенсивность отказов для проектируемых ТТС определяется по формуле

$$\lambda_{0\text{cp}} = \frac{\sum_{j=1}^m \lambda_{0j\text{cp}} \sum_{i=1}^{n_j} l_{ji}}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j} l_{ji}}, \quad (2.21)$$

где  $m$  – число типов трубопроводов, отличающихся диаметром труб или материалом изготовления;  $n_j$  – число трубопроводов  $j$ -го типа;  $\lambda_{0j\text{cp}}$  – удельная интенсивность отказов для трубопроводов определенного диаметра и материала изготовления;  $l_{ji}$  – длина  $i$ -го трубопровода  $j$ -го типа.

Усредненная длина трубопровода определяется как среднее арифметическое длин всех трубопроводов:

$$l_{\text{cp}} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m l_j, \quad (2.22)$$

где  $m$  – общее число трубопроводов в сети;  $l_j$  – длина  $j$ -го трубопровода, км.

С учётом формул (2.21) и (2.22) усредненная интенсивность отказа трубопровода с усредненной длиной согласно формуле (2.20) составит



$$\lambda_{\text{cp}} = \frac{\sum_{j=1}^m \lambda_{0j \text{ cp}} \sum_{i=1}^{n_j} l_{ji}}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n l_{ji}} \cdot \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m l_j. \quad (2.23)$$

Для эксплуатируемых ТТС с достаточно большим накопленным объёмом статистических сведений об отказах трубопроводов усреднённую интенсивность отказов следует рассчитывать по формуле

$$\lambda_{\text{cp}} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \lambda_j, \quad (2.24)$$

где  $m$  – общее число трубопроводов;  $\lambda_j$  – интенсивность отказа  $j$ -го трубопровода.

Построение таблицы расчётных вероятностей состояний для произвольной распределительной трубопроводной сети, кроме знания числа трубопроводов  $m$  и удельной интенсивности отказов  $\lambda_{0 \text{ cp}}$  или средней интенсивности отказов  $\lambda_{\text{cp}}$ , требует ещё знания числа каналов обслуживания СМО (число ремонтных бригад)  $r$  и средней интенсивности восстановления трубопроводов  $\mu_{\text{cp}}$ .

Число ремонтных бригад, или каналов обслуживания СМО, для проектируемых ТТС определяется по формулам:

$$r_1 = \left\lceil \frac{1}{50} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n l_{ji} \right\rceil \quad \text{или} \quad r_2 = r_1 + 1. \quad (2.25)$$

Здесь  $\lceil \cdot \rceil$  – оператор взятия целой части числа.

Для более тщательного исследования проектируемой ТТС рекомендуется анализировать два возможных варианта систем: при числах ремонтных каналов, равных соответственно  $r_1$  и  $r_2$ .

Для эксплуатируемых ТТС число каналов  $r$  берётся равным числу ремонтных бригад в аварийно-ремонтной службе.

В качестве средней интенсивности восстановления для проектирования произвольной распределительной трубопроводной сети  $\mu_{\text{ср}}$ , как и в рассмотренном примере, выступает величина  $182,5 \text{ год}^{-1}$ , которая берётся из расчета проведения одного ремонта в течение двух суток.

Для эксплуатируемых ТТС средняя интенсивность восстановления определяется по накопленным статистическим данным как среднее арифметическое интенсивностей восстановления трубопроводов для всех ремонтных бригад:

$$\mu_{\text{ср}} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \mu_i, \quad (2.26)$$

где  $k$  – число ремонтных бригад;  $\mu_i$  – интенсивность восстановления трубопроводов для  $i$ -й ремонтной бригады.

В формулах (2.5) – (2.19) для определения вероятностей состояний вместо интенсивностей отказов и восстановления фигурирует их отношение в виде коэффициента загрузки  $\rho$ . Чтобы воспользоваться этими формулами для произвольной трубопроводной сети, необходимо коэффициент  $\rho$  заменить усредненным аналогом  $\rho_{\text{ср}}$ .

Усредненный коэффициент загрузки для проектируемых сетей определяется выражением

$$\rho_{\text{ср}} = \frac{\lambda_{\text{ср}}}{282,5} \cdot k_{\mu}. \quad (2.27)$$

Здесь  $\lambda_{\text{ср}}$  рассчитывается в соответствии с формулой (2.23),  $k_{\mu}$  – коэффициент размерности, равный величине 1 год.

Усредненный коэффициент загрузки для эксплуатируемых сетей определяется выражением

$$\rho_{\text{ср}} = \frac{\lambda_{\text{ср}}}{\mu_{\text{ср}}} . \quad (2.28)$$

Здесь  $\lambda_{\text{ср}}$  рассчитывается по формуле (2.24), а  $\mu_{\text{ср}}$  – по формуле (2.26).

Заменяя в формуле (2.19) коэффициент загрузки  $\rho$  на его усредненное значение, определяемое для проектируемых сетей по формуле (2.27), а для эксплуатируемых – по (2.28), получаем усредненную вероятность безотказной работы произвольно выбранной сети

$$P_0 = \left( 1 + \sum_{i=1}^m \frac{\rho_{\text{ср}}^i}{i!} \prod_{j=0}^{i-1} (m-j) + \sum_{i=r+1}^m \frac{\rho_{\text{ср}}^i}{r^{i-r} r!} \prod_{j=0}^{i-1} (m-j) \right)^{-1} . \quad (2.29)$$

Здесь параметры  $m$  и  $r$  берутся для эксплуатируемых сетей на основании фактических данных, а для проектируемых – соответственно из проектных данных и формулы (2.25).

Вероятность, вычисленная по формуле (2.29), может служить оценкой *технической надёжности* распределительной транспортной сети. Соответственно вероятность неисправного состояния сети (наличие 1-го, 2-х или более поврежденных трубопроводов), вычисленная по формуле  $P_0^- = 1 - P_0$ , может служить оценкой *технической ненадёжности* системы.

Вероятность  $P_0$ , будучи умноженная на 100%, показывает в процентном отношении, сколько времени в году система находит-

ся в абсолютно исправном состоянии. Вероятность  $P_0^-$  показывает относительное время неисправного состояния системы.

Из формулы (2.29) следует, что техническая надёжность не зависит от структуры сети.

Из анализа табл.1.1 следует, что при одинаковой суммарной длине трубопроводов их количество практически не влияет на техническую надёжность системы.

Из выражения (2.20) следует, что техническая ненадёжность пропорциональна суммарной длине трубопроводов сети. Чем больше суммарная длина трубопроводов, тем менее надёжная сеть в эксплуатации.

Зная величины  $P_0^-$  и длину  $j$ -го трубопровода  $l_j$ , можно оценить относительное время неисправного состояния и техническую надёжность данного трубопровода соответственно по формулам:

$$\tilde{Q}_j = \frac{P_0^- l_j}{L} ; \quad (2.30)$$

$$\tilde{P}_j = 1 - \tilde{Q}_j = 1 - \frac{P_0^- l_j}{L} . \quad (2.31)$$

Здесь  $L$  – суммарная длина всех трубопроводов сети.

Поскольку функциональная надёжность находится в зависимости от структуры сети, сделанные выводы касаются только технической надёжности протяженных трубопроводов.

## РАЗДЕЛ 3

### **ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ НАДЁЖНОСТЬ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ**

В предыдущем разделе была дана общая характеристика проблемы надёжности для ТТС. Было отмечено, что функциональная надёжность, под которой понимается способность ТТС бесперебойно поставлять целевой продукт потребителям, при выполнении условий (1.3) не зависит от параметров потокораспределения и показателей качества целевого продукта. Было показано, что функциональная надёжность зависит от технической надёжности конструктивных элементов системы, топографических и топологических свойств системы: степени старения и износа всех конструктивных элементов ТТС, протяженности, диаметра, толщины, материала труб трубопроводов и структуры их объединения в систему. Для формализации такой зависимости и аналитического описания метода расчёта надёжности поставки ЦП потребителю необходима математическая модель ТТС, которая однозначно отражала бы топологию трубопроводной сети, пространственные и временные параметры её элементов: наличие, местоположение и состояние запорной арматуры, характеристики трубопроводов, интенсивность выхода из строя и восстановление конструктивных элементов ТТС и т.п.

#### **3.1. Математическая модель трубопроводных транспортных систем**

Прежде всего, ограничим рассмотрение объекта исследования рассмотрением только её наиболее сложной части – распределительной трубопроводной сети, т.е. сведём расчёт надёжности ТТС к расчёту надёжности поставки целевого продукта потреби-

телям посредством только трубопроводной сети, не учитывая надёжность активных источников и неопределённость потребления.

Далее, для упрощения и конкретизации вербальных описаний ограничим объект исследования только водопроводными ТТС, хотя нет никаких принципиальных причин для их особого выделения из рассматриваемого множества напорных сетевых систем.

Введём ряд опорных определений.

**Определение 1.** Трубопровод – это труба длиной  $l$  с одинаковым диаметром и одинаковой толщины стенок, изготовленная из однородного материала, имеющая одно начало и один конец (соответственно начало и конец трубопровода) и предназначенная для напорной транспортировки целевого продукта.

**Определение 2.** Запорная арматура, или задвижка, – это устройство вентильного типа, находящееся на конце трубопровода (в начале, в конце или в начале и конце трубы трубопровода) и предназначенное для прекращения или возобновления транспортировки целевого продукта через этот трубопровод.

**Определение 3.** Колодец – место расположения конца трубопровода или стыковки двух и более трубопроводов, характеризующееся высотой над уровнем моря.

Из приведенных определений вытекают следующие утверждения:

– из *определений 1 и 2* следует, что один трубопровод может иметь две (в начале и в конце), одну (в начале или в конце) или ни одной задвижки;

– из *определений 1 и 3* следует, что каждый трубопровод ограничен двумя колодцами (один – в начале, другой – конце трубопровода);

– из *определений 2 и 3* следует, что запорная арматура при её наличии на конце трубопровода располагается в том же колодце, что и конец трубопровода.

**Определение 4.** Система распределительных трубопроводов, или распределительная трубопроводная сеть, представляет со-

бой множество пространственно расположенных трубопроводов, соединенных в сеть, узлами которой являются колодцы с запорной арматурой.

**Определение 5.** Система распределительных трубопроводов имеет входные колодцы, в которых стыкуются трубопроводы с активными источниками, и выходные, в которых стыкуются трубопроводы с потребителями.

Из определений 3 – 5 следует утверждение: активные источники и потребители стыкуются с трубопроводами, но в понятие трубопроводная сеть не входят, и, следовательно, фигурировать в математической модели трубопроводной сети не могут.

На основании определений 1 – 5 и вытекающих из них утверждений, а также с учётом цели последующего использования (разработка метода расчёта функциональной надёжности) определим математическую модель распределительной трубопроводной транспортной сети. Такой однозначной моделью выступает ориентированный взвешенный граф

$$\mathbf{G}[h, z, l, \lambda, \mu, \mathbf{p}] = (\mathbf{V}, \mathbf{E}; h, z, l, \lambda, \mu, \mathbf{p}), \quad (3.1)$$

где  $\mathbf{V}$  – множество вершин графа, соответствующих водопроводным колодцам;  $\mathbf{E}$  – множество дуг графа, соответствующих реальным трубопроводам;  $h$  – весовая функция на вершинах графа, определяющая высоту колодца над уровнем моря;  $z, l, \lambda, \mu, \mathbf{p}$  – весовые функции на рёбрах графа, соответственно определяющие наличие и расположение арматуры, длину, интенсивность износа и интенсивность восстановления трубопроводов, техническую надёжность запорной арматуры.

Уточним все элементы математической модели (3.1).

Положим, что множество вершин определяется выражением

$$\mathbf{V} = \{v_i\}_1^n. \quad (3.2)$$

Тогда множество дуг определится выражением

$$\mathbf{E} = \{e_{ij} = (v_i v_j) \mid i, j = \overline{1, n}, i \neq j\}. \quad (3.3)$$

Обозначим множество дуг, исходящих из вершины  $v_k$ , как

$$\mathbf{E}_k^- \subseteq \{e_{kj} \mid e_{kj} \in \mathbf{E}\}, \quad k = \overline{1, n}, \quad (3.4),$$

а множество дуг, входящих в вершину  $v_k$ , как

$$\mathbf{E}_k^+ \subseteq \{e_{ik} \mid e_{ik} \in \mathbf{E}\}, \quad k = \overline{1, n}. \quad (3.5)$$

Тогда подмножество  $\mathbf{E}_k = \mathbf{E}_k^- \cup \mathbf{E}_k^+$ , представляет собой подмножество дуг, инцидентных  $k$ -й вершине, а их объединение  $\bigcup_{k=1}^n \mathbf{E}_k = \mathbf{E}$  определяет множество всех дуг графа сети.

Направление дуг в графе (3.1) совпадает с направлением ЦП в соответствующих трубопроводах и определяется или на основе первого проектного расчета потокораспределения, или по опытными данным, накопленным в процессе длительной эксплуатации сети, или с помощью весовой функции  $h$ :

- дуга  $e_{ij}$  ориентирована от вершины  $v_j$  к  $v_i$ , если  $h_{v_i} \geq h_{v_j}$ ;
- дуга  $e_{ij}$  ориентирована от вершины  $v_j$  к  $v_i$ , если  $h_{v_i} < h_{v_j}$ .

Определение направлений дуг предпочтительнее производить с помощью весовой функции  $h$ , поскольку в этом случае они будут совпадать с направлением движения ЦП самотёком.

В любом случае считаем, что направления потоков известны, т.е. их определение не является задачей настоящих исследований.

Для математического описания множества всех задвижек и их расположения на трубопроводе вводится весовая функция  $z$  на



множестве  $E$ , которая отображает его на множество  $\{0,1,2,3\}$  по правилу  $z(e_{ij}) = z_{ij}$ , причем

$$z_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{если дуге } e_{ij} \text{ соответствует трубопровод} \\ & \text{без задвижек;} \\ 1, & \text{если дуге } e_{ij} \text{ соответствует трубопровод} \\ & \text{с задвижкой в начальном колодце } v_i; \\ 2, & \text{если дуге } e_{ij} \text{ соответствует трубопровод} \\ & \text{с задвижкой в конечном колодце } v_j; \\ 3, & \text{если дуге } e_{ij} \text{ соответствует трубопровод} \\ & \text{с двумя задвижками.} \end{cases} \quad (3.6)$$

Для указания параметров трубопроводов, влияющих на результаты расчета надежности поставки ЦП конкретным пользователям, введены четыре весовые функции:

– функция расстояния  $l$ , относящая каждой дуге графа  $e \in E$  действительное число  $l(e) > 0$  в качестве параметра длины соответствующего трубопровода;

– функция интенсивности отказов  $\lambda$ , относящая каждой дуге графа  $e \in E$  действительное число  $\lambda(e) > 0$  в качестве параметра интенсивности отказов соответствующего трубопровода;

– функция восстановления  $\mu$ , относящая каждой дуге графа  $e \in E$  действительное число  $\mu(e) > 0$  в качестве параметра интенсивности восстановления соответствующего трубопровода после его выхода из строя;

– весовая вектор-функция технической надёжности запорной арматуры  $\mathbf{p}$ , относящая к каждой дуге графа  $e \in E$  двухкомпонентную вектор-строку  $\mathbf{p}_{ij}^T = [p^- \quad p^+]$ , компонентами которой являются вероятности безотказной работы запорной арматуры,

расположенной в начале и конце соответствующего трубопровода, причем

$$\mathbf{p}_{ij}^T = \begin{cases} \begin{bmatrix} 1 & 1 \end{bmatrix} & \text{при } z(e_{ij}) = 0; \\ \begin{bmatrix} p^-(e) & 1 \end{bmatrix} & \text{при } z(e_{ij}) = 1; \\ \begin{bmatrix} 1 & p^+(e) \end{bmatrix} & \text{при } z(e_{ij}) = 2; \\ \begin{bmatrix} p^-(e) & p^+(e) \end{bmatrix} & \text{при } z(e_{ij}) = 3. \end{cases} \quad (3.7)$$

В выражении (2.7) величины  $p^-(e)$  и  $p^+(e)$ , будучи вероятностями, представляют собой действительные числа из диапазона  $[0, 1]$  и определяют степень износа и состояние запорной арматуры, находящейся соответственно в начале или конце трубопровода. При отсутствии запорной арматуры на любом конце трубопровода данные величины приравниваются к единице.

Выражения (3.1) – (3.7) представляют собой математическую модель водопроводной сети для решения задачи расчета функциональной надёжности.

Введенные весовые функции  $h, l, \lambda, \mu, \mathbf{p}$  определяют основное отличие математической модели (3.1) – (3.7) для водопроводных распределительных сетей от математической модели, предложенной в [43] для решения задачи локализации аварийно-ремонтной зоны в инженерных сетях.

### 3.2. Надёжность аварийно-ремонтных зон распределительной трубопроводной сети

В расчёте функциональной надёжности ТТС фигурирует понятие «аварийно-ремонтная зона» и «несущественная запорная арматура». Для однозначного толкования этих понятий введем два определения.

**Определение 6.** Аварийно-ремонтной зоной (АРЗ) трубопровода  $e_{ij}$  будем называть ту часть трубопроводной сети с мини-

мально возможным числом потребителей (вершин графа), которая отсекается запорной аппаратурой в состоянии «закрыто» от всей сети с целью прекращения доступа целевого продукта в трубопровод  $e_{ij}$  в случаях проведения аварийных или профилактических работ.

**Определение 7.** Несущественной называют запорную арматуру на трубопроводе, принадлежащему конкретной АРЗ, состояние которой («закрыто» или «открыто») не влияет на доступ целевого продукта как в сам трубопровод, так и в конкретную АРЗ.

Примеры аварийно-ремонтных зон и несущественных задвижек показаны на рис.3.1. Здесь трубопроводы  $t_1$ ,  $t_2$  и  $t_3$  образуют аварийно-ремонтную зону АРЗ<sub>1</sub>, которая отсекается задвижками  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  и  $a_4$  от остальной части сети. Трубопроводы  $t_4$ ,  $t_5$ ,  $t_6$ ,  $t_7$ ,  $t_8$  и  $t_9$  образуют аварийно-ремонтную зону АРЗ<sub>2</sub>, которая отсекается задвижками  $a_2$ ,  $a_3$  и  $a_5$  от остальной части сети. Задвижки  $a_{c1}^-$  и  $a_{c2}^-$ , принадлежащие зоне АРЗ<sub>2</sub>, являются несущественными, поскольку их состояния не влияют на доступ целевого продукта в трубопроводы  $t_4$ ,  $t_5$  и АРЗ<sub>2</sub>.

Несмотря на то, что несущественная задвижка не оказывает никакого влияния на доступ целевого продукта в сеть, тем не менее, от её положения («закрыто» или «открыто») зависят результаты гидравлического расчёта. Положение задвижки меняет её гидравлическое сопротивление, а положение «закрыто» — и структуру сети.

АРЗ интересна тем, что для всех потребителей одной и той же зоны вероятность (относительное время) поставки целевого продукта одинакова, т.е. функциональная надёжность сети относительно потребителей одной АРЗ имеет одно и то же значение. Связано это с тем, что все потребители одной зоны зависят от работоспособности каждого трубопровода этой зоны. Любой трубопровод, вышедший из строя, вынуждено лишает поставок целевого продукта всех потребителей зоны.

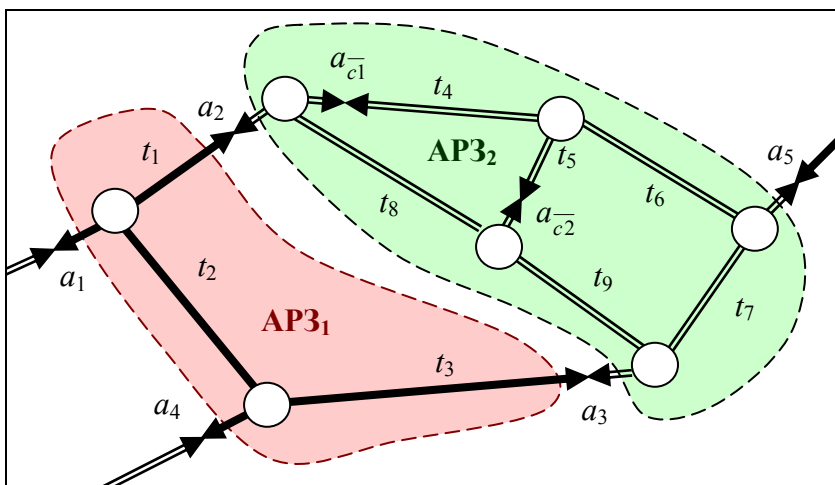


Рис.3.1 – Фрагмент трубопроводной сети

Поскольку АРЗ считается работоспособной, если все её элементы работоспособны, то ей соответствует последовательная модель надёжности технических систем (рис.3.2).

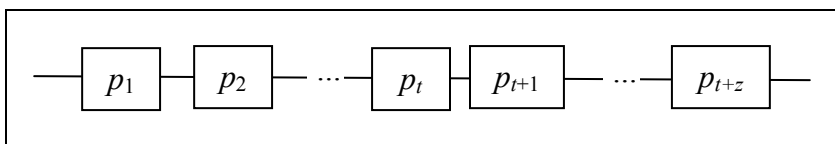


Рис.3.2 – Последовательная модель надёжности технических систем

Последовательная модель надёжности АРЗ включает надёжности всех трубопроводов  $p_1, p_2, \dots, p_t$  и несущественных задвижек  $p_{t+1}, p_{t+2}, \dots, p_{t+z}$ . Здесь  $t$  – общее количество трубопроводов в АРЗ,  $z$  – количество несущественных задвижек в зоне. Техническая надёжность всей зоны  $P_z$  в этом случае определяется по формуле

$$P_Z = \left( \prod_{i=1}^t p_i \right) \cdot \left( \prod_{i=t+1}^{t+z} p_i \right) = \prod_{i=1}^{t+z} p_i. \quad (3.8)$$

Топологическая структура АРЗ может иметь самую разную конфигурацию, но как бы трубопроводы и несущественные за-движки не объединялись в единую АРЗ, модель надёжности (3.8) этой зоны будет оставаться одной и той же.

Из сказанного следуют два очень важных вывода:

– **техническая надёжность любой АРЗ не зависит от структуры этой АРЗ;**

– **функциональная надёжность сети относительно потребителей одной и той же АРЗ также не зависит от её структуры.**

Формула (3.8) для расчёта надёжности АРЗ может быть использована, если известны надёжности всех элементов зоны. Она эффективна при проектировании новых сетей, когда надёжность каждого элемента зоны может быть определена по паспортным данным. В действующих сетях в силу различных причин надёжность элемента в процессе эксплуатации может претерпеть значительные изменения и отличаться от паспортной. Поэтому в последнем случае предпочтение отдаётся статистическим или аналитико-статистическим методам расчёта надёжности.

Статистический расчёт даёт наиболее адекватную оценку надёжности АРЗ. Если статистические данные накоплены за достаточно продолжительный период времени  $T$ , то техническая надёжность  $k$ -й зоны ( $k \in \{1, 2, \dots, z\}$ ;  $z$  – общее количество зон в эксплуатируемой сети) может быть определена по формуле:

$$P_{Zk} = \frac{t_k}{T}, \quad (3.9)$$

где  $t_k$  – суммарное время пребывания зоны в исправном состоянии в течение периода времени  $T$ .

Надёжность  $k$ -й зоны может быть оценена с помощью формулы

$$P_{zk} = 1 - \frac{P_0^- l_k}{L}, \quad (3.10)$$

где  $P_0^-$  – вероятности нахождения всей сети в неисправном состоянии,  $P_0^- = 1 - P_0$ ,  $P_0$  – вероятность нахождения всей сети в работоспособном состоянии, рассчитанная по формуле (2.29);  $l_k$  – суммарная длина трубопроводов  $k$ -й зоны;  $L$  – суммарная длина всех трубопроводов сети.

Оценка (3.10) тем точнее, чем выше средняя надёжность задвижки условно не обладают длиной, то при их низкой надёжности и большой разнице в сроках эксплуатации выражения (3.9) и (3.10) могут иметь значительную погрешность.

Наконец, надёжность  $k$ -й зоны может быть определена по формуле (2.29), если рассматривать аварийно-ремонтную зону как самостоятельную сеть

$$P_{zk} = P_{0k}. \quad (3.11)$$

Таким образом, техническую надёжность АРЗ можно определить по одной из четырёх формул (3.8) – (3.11). Ни одна из приведенных формул не связана со структурой сети. Именно поэтому техническая надёжность, это исходный «материал» для определения функциональной надёжности.

### 3.3. Функциональная надёжность сети относительно потребителей аварийно-ремонтной зоны

Разработка метода расчёта функциональной надёжности сети базируется на двух утверждениях:

**Утверждение 1.** *Функциональная надёжность трубопроводной сети относительно потребителей одной и той же  $k$ -й зоны по своей величине меньше или равна технической надёжности этой зоны*

$$P_{Zk}^f \leq P_{Zk} . \quad (3.12)$$

Обоснованием утверждения является то, что вероятность (относительное время) потребления целевого продукту в зоне не может быть больше вероятности исправного состояния этой зоны.

**Утверждение 2.** *Функциональная надёжность трубопроводной сети относительно потребителей одной и той же  $k$ -й зоны равна произведению технической надёжности  $k$ -й зоны и функциональной надёжности сети относительно этой же зоны*

$$P_{Zk}^f = P_{Zk} \cdot P_{Xk}^f . \quad (3.13)$$

Объясняется это тем, что поступление ЦП от источника в любую зону соответствует последовательной модели надёжности, которая показана на рис.3.3. Для нормального снабжения потребителей  $k$ -й зоны исправными должны быть и сама зона (все трубопроводы и несущественные задвижки зоны исправны), и та часть трубопроводной сети, без которой ЦП от источника в  $k$ -ю зону не поступает.

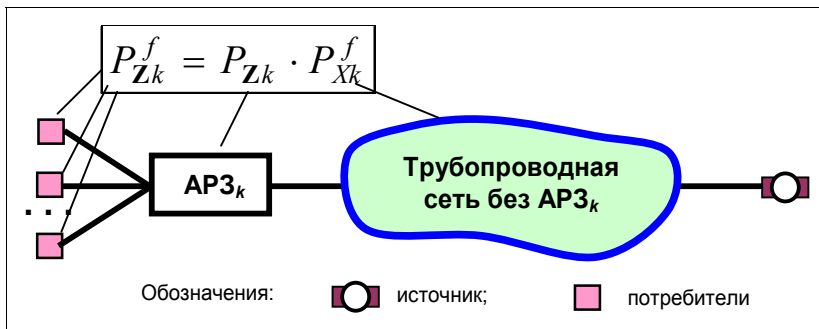


Рис.3.3 – Модель функциональной надёжности сети относительно потребителей  $k$ -й аварийно-ремонтной зоны трубопроводной сети

Утверждение (3.13) при наличии только одного источника ЦП в сети порождает две модели расчёта функциональной надёжности.

Первая модель имеет место, когда  $k$ -я зона стыкуется с источником ЦП непосредственно через одну или несколько задвижек. В этом случае функциональная надёжность сети относительно потребителей  $k$ -й зоны определяется с помощью выражения

$$P_{Xk}^f = P_{Zk} \cdot P_{Xk}^f = P_{Zk} \cdot \prod_{i=1}^{card \mathbf{W}_k} p_{ki}, \quad (3.14)$$

где  $\mathbf{W}_k$  – множество всех существенных задвижек, отсекающих  $k$ -ю зону от всей сети;  $p_{ki}$  – техническая надёжность  $i$ -й существенной задвижки  $k$ -й зоны.

Первая модель функциональной надёжности сети в виде графической схемы показана на рис.3.4. Здесь  $k$ -я зона соединяется с остальной частью сети трубопроводом, помеченным пунктирной линией. Это означает, что соединительный трубопровод может иметь место в сети или отсутствовать. Кроме того,  $k$ -я зона может соединяться *несколькими* трубопроводами с остальной частью сети.

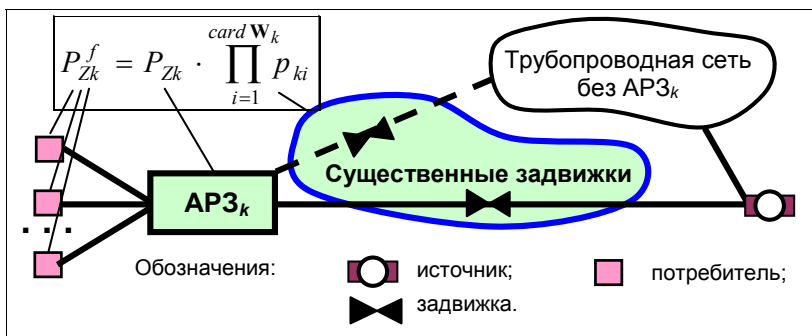


Рис.3.4 – Первая модель функциональной надёжности сети относительно потребителей  $k$ -й аварийно-ремонтной зоны трубопроводной сети



Вторая, или основная, модель имеет место, когда  $k$ -я зона не стыкуется с источником, т.е. ЦП к потребителям  $k$ -й зоны поступает через другие зоны сети. Основная модель соответствует общему случаю. Расчётная формула для функциональной надёжности совпадает с (3.13).

$$P_{Zk}^f = P_{Zk} \cdot P_{Xk}^f.$$

Здесь индекс  $X$  говорит о том, что величина  $P_{Xk}^f$  пока является неизвестной, и её ещё необходимо найти. Данная модель показана на рис.3.5.

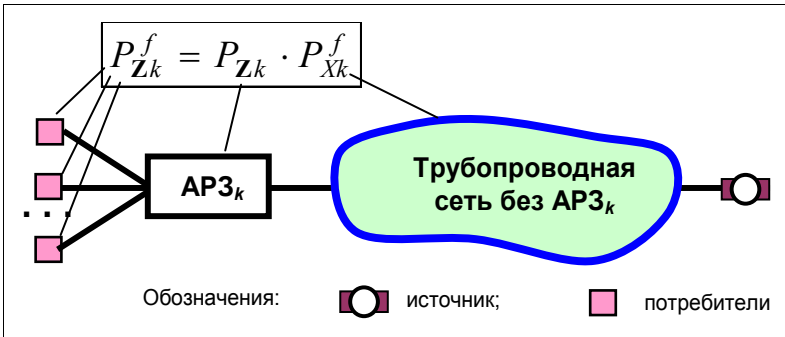


Рис.3.5 – Вторая модель функциональной надёжности сети относительно потребителей  $k$ -й аварийно-ремонтной зоны трубопроводной сети

Анализ моделей позволяет сделать следующие выводы:

- принципиально невозможно никакими средствами добиться того, чтобы функциональная надёжность сети относительно потребителей одной и той же зоны численно превышала техническую надёжность этой зоны;
- повысить функциональную надёжность сети относительно потребителей одной и той же зоны можно за счёт увеличения функциональной надёжности сети относительно этой зоны, т.е. за счёт роста вероятности подачи ЦП в эту зону;

– увеличение общей длины трубопроводов в конкретной АРЗ приводит к снижению функциональной надёжности сети относительно потребителей этой зоны и наоборот;

– преобразование АРЗ в две и более АРЗ за счет ввода новых существенных задвижек позволяет повысить исходную функциональную надёжность сети относительно потребителей этих зон;

– для расчета функциональной надёжности по основной модели (3.13) необходимо иметь метод расчета функциональной надёжности сети  $P_{Xk}^f$  относительно произвольно выбранной  $k$ -й зоны.

Из модели (3.13) с учётом (3.14) получаем универсальную модель расчёта функциональной надёжности трубопроводной сети  $P_{Zk}^f$  относительно потребителей произвольно взятой  $k$ -й зоны

$$P_{Zk}^f = \begin{cases} P_{Zk} \cdot \prod_{i=1}^{card W_k} p_{ki}, & \text{если } k - \text{я зона} \\ & \text{стыкуется с источником ЦП;} \\ P_{Zk} \cdot P_{Xk}^f & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (3.15)$$

Величина  $P_{Zk}$  в (3.8) определяется по одной из формул (3.8) – (3.12), и в дальнейшем будем её считать известной. Поэтому проблема расчета функциональной надёжности, по сути, сводится к определению величины  $P_{Xk}^f$ , т.е. к определению функциональной надёжности сети относительно произвольно взятой  $k$ -й аварийно-ремонтной зоны, когда она непосредственно не стыкуется с источником ЦП.

### 3.4. Расчёт функциональной надёжности сети относительно аварийно-ремонтной зоны

Определение функциональной надёжности в общем случае, т.е. в соответствии с выражением (3.13), требует расчёта функ-

циональной надёжности сети  $P_{Xk}^f$  относительно произвольно взятой  $k$ -й аварийно-ремонтной зоны,  $k \in \{1, 2, \dots, z\}$ .

Если техническая надёжность  $P_{Zk}$  в (3.15) является внутренним свойством  $k$ -й АРЗ, не зависящим от структуры  $k$ -й зоны и структуры всей сети, то искомая величина  $P_{Xk}^f$  определяет свойство всей сети по отношению к  $k$ -й зоне и находится в зависимости от структуры сети и занимаемого места  $k$ -й зоной в этой структуре. Для каждой АРЗ сети величина  $P_{Xk}^f$  имеет своё собственное значение.

Разобьем исходный взвешенный ориентированный граф  $G[h, z, l, \lambda, \mu, p]$ , соответствующий распределительной трубопроводной сети, на подграфы, каждый из которых соответствует одной аварийно-ремонтной зоне. Если теперь рассматривать полученные подграфы как простейшие элементы сети и компоновать из них новый граф, то мы получим наглядную схему структуры всей сети относительно АРЗ. В новом графе каждой  $k$ -й вершине ( $k = \overline{1, z}$ ) будет соответствовать целая  $k$ -я зона. Каждой дуге графа будет соответствовать существенная задвижка, объединяющая две зоны (две вершины). При этом направление дуги совпадает с направлением движения ЦП, определяемое в результате гидравлического расчёта, а количество дуг из одной вершины в другую совпадает с количеством существенных задвижек между двумя зонами. Вершина, соответствующая источнику ЦП, сохраняет своё положение, которое она имела в исходном графе. Все потребители одной зоны, если они есть, сводятся к одному условному потребителю, т.к. функциональная надёжность сети по отношению ко всем потребителям одной и той же зоны всегда одинакова.

Преобразование исходного графа  $G[h, z, l, \lambda, \mu, p]$  в граф аварийно-ремонтных зон (граф АРЗ) производится по строгому алгоритму, не допускающему какой-либо неоднозначности. Для подтверждения сказанного продемонстрируем преобразование графа гипотетической сети в соответствующий граф АРЗ.

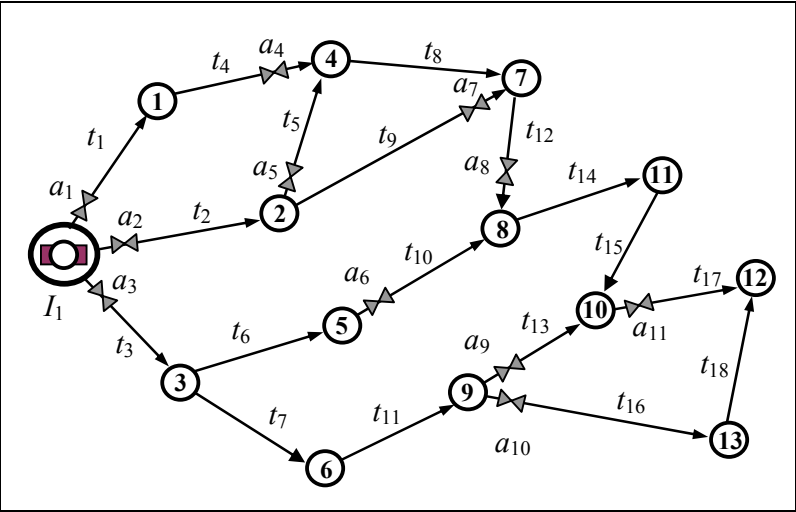


Рис.3.6 – Исходный граф гипотетической распределительной трубопроводной сети

Пусть граф гипотетической распределительной трубопроводной сети имеет вид, изображенный на рис.3.6. В данном случае трубопроводная сеть состоит из одного источника ЦП  $I_1$ , восемнадцати трубопроводов  $t_1, t_2, \dots, t_{18}$ , одиннадцати задвижек  $a_1, a_2, \dots, a_{11}$  и тринадцати колодцев 1, 2, ..., 13.

Трубопроводная сеть имеет шесть АРЗ, которые определяются по строгой процедуре в зависимости от расположения существенных задвижек в сети. Данная процедура и соответствующая вычислительная функция будут рассмотрены позже. В предложенной сети все задвижки являются существенными. Состав всех АРЗ отражен в табл.3.1.

Таблица 3.1

№	Конструктивные элементы АРЗ
---	-----------------------------

АРЗ	Трубопроводы	Отсекающие задвижки	Колодцы
1	$t_1, t_4$	$a_1, a_4$	1
2	$t_2, t_9$	$a_2, a_5, a_7$	2
3	$t_3, t_6, t_7, t_{11}$	$a_3, a_6, a_9, a_{10}$	3, 5, 6, 9
4	$t_5, t_8, t_{12}$	$a_4, a_5, a_7, a_8$	4, 7
5	$t_{10}, t_{13}, t_{14}, t_{15}$	$a_6, a_8, a_9, a_{11}$	8, 10, 11
6	$t_{16}, t_{17}, t_{18}$	$a_{10}, a_{11}$	12, 13

Граф АРЗ, получаемый в результате преобразования исходного графа, изображен на рис.3.7. Граф является прекрасным наглядным средством для выражения общей структуры ТТС. Он показывает, каким образом и с помощью какой запорной арматуры аварийно-ремонтные зоны стыкуются между собой и с источником ЦП.

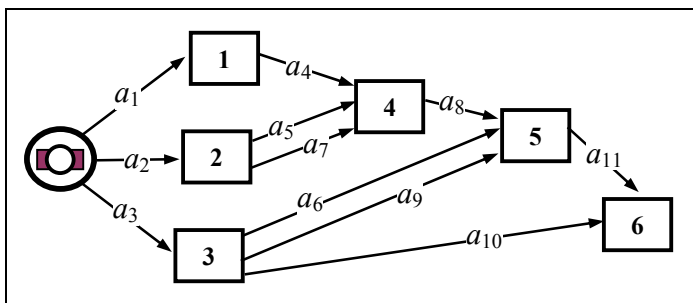


Рис.3.7 – Граф аварийно-ремонтных зон гипотетической трубопроводной сети

Граф на рис.3.7 может быть упрощён. Задвижки  $a_2$  и  $a_7$ , соединяющие зоны №2 и №4, несут одинаковую функциональную

нагрузку. Если одна из зон №2 и №4 пребывает в аварийном состоянии, то обе задвижки  $a_2$  и  $a_7$  должны находиться в положении «закрыто». Если обе зоны №2 и №4 пребывают в исправном состоянии, то обе задвижки должны находиться в рабочем состоянии «незакрыто». Поэтому параллельные дуги, соединяющие вершины 2 и 4, можно заменить одной обобщенной дугой. Этой дуге будет соответствовать обобщенная задвижка с технической надёжностью  $p_{a_{5,7}} = p_{a_5} \cdot p_{a_7}$ . При этом ориентация дуги должна совпадать с ориентацией заменяемых дуг. Если направления заменяемых дуг противоположны, то обобщенная дуга должна быть двунаправленной. То же самое касается и задвижек  $a_6$  и  $a_9$ , соединяющих аварийно-ремонтные зоны №3 и №5. Обобщающая задвижка в этом случае будет иметь техническую надёжность  $p_{a_{6,9}} = p_{a_6} \cdot p_{a_9}$ .

Анализ графа АРЗ показывает, что зоны №1, №2 и №3 непосредственно стыкуются с источником ЦП, а зоны №4, №5 и №6 не имеют непосредственной стыковки с источником. Следовательно, функциональные надёжности сети относительно потребителей 1-й, 2-й и 3-й зон определяются соотношением (3.14):

$$\begin{aligned} P_{Z_1}^f &= P_{Z_1} \cdot p_{a_1} \cdot p_{a_4}; \\ P_{Z_2}^f &= P_{Z_2} \cdot p_{a_2} \cdot p_{a_5} \cdot p_{a_7} = P_{Z_2} \cdot p_{a_{2,5,7}}; \\ P_{Z_3}^f &= P_{Z_3} \cdot p_{a_3} \cdot p_{a_6} \cdot p_{a_9} \cdot p_{a_{10}} = P_{Z_3} \cdot p_{a_{3,6,9,10}}. \end{aligned}$$

АРЗ с номерами 4, 5 и 6 не имеют непосредственной стыковки с источником ЦП. Для определения функциональной надёжности сети относительно потребителей этих зон следует предварительно определить функциональную надёжность сети  $P_{Xk}^f$  относительно каждой из этих зон.

Процедура определения  $P_{Xk}^f$  (в случае нестыковки АРЗ с источником ЦП) является наиболее сложным и трудно формализуемым этапом в расчёте функциональной надёжности.

Каждая  $k$ -я АРЗ, не имеющая стыковки с источником ЦП, обладает собственной уникальной моделью для расчёта  $P_{Xk}^f$ , которая зависит от структуры графа АРЗ и места нахождения  $k$ -й зоны в этой структуре. Так, для рассматриваемой гипотетической трубопроводной сети расчётные модели для 4-й, 5-й и 6-й зон имеют вид, показанный на рис.3.7.

Расчётная модель для функциональной надёжности гипотетической сети относительно АРЗ №4 (рис.3.8,а) имеет элемент 6, соответствующий АРЗ №6, который изображен пунктирными линиями. Это означает, что функциональная надёжность сети относительно АРЗ №4 не зависит от технической надёжности АРЗ №6. Целевой продукт от источника может поступать в АРЗ №4 через АРЗ №5. Но поступление ЦП в АРЗ №5 не зависит от работоспособности зоны №6. Поставка ЦП в АРЗ №5 зависит только от работоспособности АРЗ №3. Поэтому АРЗ №6 никоим образом не влияет на надёжность поставки ЦП в АРЗ №4, и её следует исключить из модели.

Аналогичная ситуация наблюдается в модели функциональной надёжности сети относительно АРЗ №5 (рис.3.8,б).

Расчётная модель для функциональной надёжности гипотетической сети относительно АРЗ №6 (рис.3.8,с) имеет несущественную связь между АРЗ №3 и АРЗ №5, которая изображена пунктирной линией. Поскольку АРЗ №3 непосредственно стыкуется с АРЗ №6, то её влияние на функциональную надёжность АРЗ №6 не зависит от АРЗ №5. Поэтому связь между АРЗ №3 и АРЗ №5 следует исключить из модели.

При расчёте функциональной надёжности сети относительно  $k$ -й зоны, независимо от её расположения в сети, расчётная модель обязательно должна включать все существенные задвижки, которые отсекают её от остальной части сети.

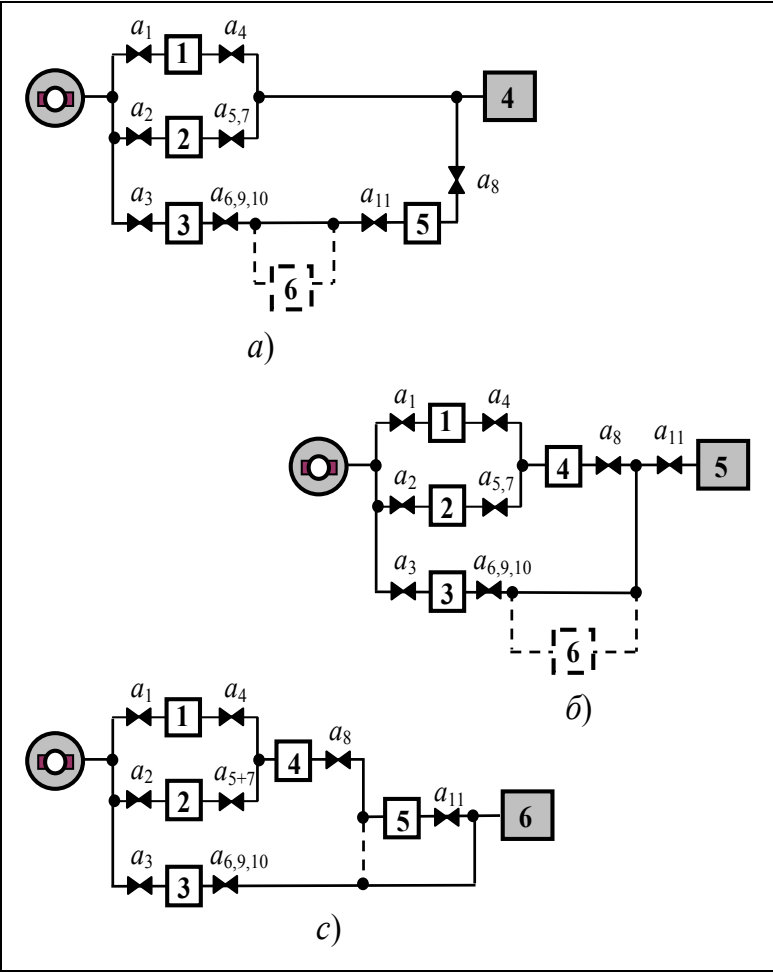


Рис.3.8 – Расчётные модели функциональной надёжности сети относительно аварийно-ремонтных зон

После построения расчётных моделей вычисление искомых функциональных надёжностей сети относительно АРЗ  $P_{Xk}^f$  про-



изводится по методике расчёта надёжности технических систем со смешанным соединением элементов. Результаты этих расчётов сведены в табл.3.2.

Таблица 3.2

№ АРЗ, $k$	Функциональная надёжность сети относительно	
	$k$ -й аварийно-ремонтной зоны, $P_{X_k}^f$	потребителей $k$ -й АРЗ, $P_{Z_k}^f$
1	$p_{a_1} \cdot p_{a_4}$	$P_{Z_1} \cdot p_{a_{1,4}}$
2	$p_{a_2} \cdot p_{a_{5,7}}$	$P_{Z_2} \cdot p_{a_{2,5,7}}$
3	$p_{a_3} \cdot p_{a_{6,9,10}}$	$P_{Z_3} \cdot p_{a_{3,6,9,10}}$
4	$1 - \left\{ 1 - \left[ 1 - \left( 1 - p_{a_1} P_{Z_1} p_{a_4} \right) \left( 1 - p_{a_2} P_{Z_2} p_{a_{5,7}} \right) \right] \right\} \times$ $\times \left\{ 1 - p_{a_3} P_{Z_3} p_{a_{6,9,10}} p_{a_{11}} P_{Z_5} p_{a_8} \right\}$	$P_{Z_4} \cdot P_{Z_4}^f$
5	$\left\langle 1 - \left\{ 1 - \left[ 1 - \left( 1 - p_{a_1} P_{Z_1} p_{a_4} \right) \left( 1 - p_{a_2} P_{Z_2} p_{a_{5,7}} \right) \right] \right\} \times \right.$ $\times P_{Z_4} p_{a_8} \cdot \left. \left\{ 1 - p_{a_3} P_{Z_3} p_{a_{6,9,10}} P_{Z_5} p_{a_8} \right\} \right\rangle p_{a_{11}}$	$P_{Z_5} \cdot P_{Z_5}^f$
6	$1 - \left\{ 1 - \left[ 1 - \left( 1 - p_{a_1} P_{Z_1} p_{a_4} \right) \left( 1 - p_{a_2} P_{Z_2} p_{a_{5,7}} \right) \right] \right\} \times$ $\times P_{Z_4} p_{a_8} P_{Z_5} p_{a_{11}} \cdot \left\{ 1 - p_{a_3} P_{Z_3} p_{a_{6,9,10}} \right\}$	$P_{Z_6} \cdot P_{Z_6}^f$

### 3.5. Основы метода расчета функциональной надёжности трубопроводных сетей

Изложенная последовательность действий по определению функциональной надёжности сети относительно потребителей  $k$ -й аварийно-ремонтной зоны в гипотетической сети формирует основы аналитического метода расчёта функциональной надёжности в ТТС высокой размерности.

Предлагаемый метод расчета надежности поставки ЦП в сложных ТТС позволяет получить вероятность поступления ЦП конкретному потребителю с учетом структуры сети и надежности функционирования отдельных элементов сети (паспортной или статистически накопленной). Метод ориентирован на трубопроводные сети (основные структурные компоненты сложных трубопроводных систем), которые по сложности своей структуры соизмеримы со сложностью трубопроводных транспортных сетей, функционирующих в различных отраслях народного хозяйства (водо-, тепло-, газоснабжение). Расчетная величина отвечает принятым государственным стандартам по надежности [13].

Исходными данными для расчета функциональной надежности сети по осуществлению поставок ЦП конкретному потребителю с помощью предлагаемого метода являются:

- топологическая структура сети с указанием длины пространственно протяженных элементов (трубопроводов), мест расположения запорной арматуры и активных элементов (насосных станций, компрессоров) и потребителей;
- интенсивности отказов пространственно протяженных элементов сети и интенсивности их восстановления;
- вероятности безотказной работы пространственно непротяженных элементов сети (активных элементов, запорной арматуры, распределительных пунктов и пр.).

Базовой теоретической основой метода являются исследования Самойленко Н.И. [35, 43 – 44, 49], Рудя И.А. [36 – 39], Гавриленко И.А. [7 – 10] и классические методы расчета надежности технических систем малой размерности.

Основными теоретическими предпосылками для разработки метода расчёта надежности поставки ЦП конкретному потребителю служат следующие утверждения:

- надежность функционирования (техническая надёжность) аварийно-ремонтной зоны не зависит от структуры АРЗ, поскольку выход из строя любого структурного элемента АРЗ приводит к вынужденному прекращению эксплуатации всех элементов АРЗ на период устранения неисправности;

- надёжность поставки ЦП (функциональная надёжность) инвариантна по отношению к потребителям одной и той же аварийно-ремонтной зоны;

- функциональная надёжность относительно потребителей конкретной аварийно-ремонтной зоны в общем случае зависит от технической надёжности всех АРЗ сети, структуры объединения АРЗ в сеть и места расположения конкретной АРЗ в этой структуре;

- функциональная надёжность относительно потребителей одной и той же аварийно-ремонтной зоны по своей величине меньше или равна технической надёжности этой зоны.

*Метод расчёта функциональной надёжности включает 7 последовательных этапов (задач):*

1. Формирование математической модели сложной трубопроводной транспортной сети в виде взвешенного графа.

2. Разбиение исходного взвешенного графа трубопроводной транспортной сети на подграфы, каждый из которых соответствует одной АРЗ.

3. Расчет надёжности функционирования (технической надёжности) АРЗ.

4. Преобразование исходного взвешенного графа сети большой размерности во взвешенный граф АРЗ малой размерности (замена каждой АРЗ одной вершиной).

5. Построение расчётных моделей функциональной надёжности относительно АРЗ, которые не стыкуются непосредственно с источником ЦП.

6. Анализ каждой расчётной модели с целью выявления и удаления из модели несущественных связей между аварийно-ремонтными зонами и самих зон, не влияющих на функциональную надёжность.

7. Расчет функциональной надёжности сети относительно АРЗ и функциональной надёжности сети относительно потребителей одной и той же зоны с помощью классических методов расчета надёжности (функционирования) технических систем.

Рассмотрим каждый этап более подробно.

### **3.5.1. Формирование математической модели сложной трубопроводной транспортной сети**

Математическая модель сложной трубопроводной транспортной сети в виде взвешенного графа, ориентированная на её использование в расчётах технической и функциональной надёжности, подробно рассмотрена в п.3.1. Поэтому рассмотрение этапа формирования математической модели ограничим только рекомендацией по его реальному выполнению.

Математическая модель трубопроводной сети представляет собой взвешенный граф, который описывается математическими выражениями (3.1) – (3.7). Наиболее благоприятной компьютерной средой для формирования математической модели является графическая среда системы автоматизированного выполнения графических работ. Очень важными достоинствами системы *AutoCAD* является наличие встроенных средств по автоматическому формированию баз данных после отрисовки графа сети и наличие встроенного алгоритмического языка программирования *AutoLISP*, позволяющего решать любые расчётно-графические инженерные задачи.

Граф сети в системе создаётся один раз, а затем поддерживается в рабочем состоянии, адекватном проектной или реально существующей сети, средствами графического редактирования системы *AutoCAD*.

По мнению авторов, графическая среда *AutoCAD* – наиболее удобная и полезная среда для таких сложных эволюционирующих систем в пространстве и во времени, какими являются современные региональные и городские распределительные трубопроводные системы.

### **3.5.2. Разбиение взвешенного графа трубопроводной сети на подграфы аварийно-ремонтных зон**

Для решения задачи разбиения графа сети на подграфы АРЗ в качестве исходной математической модели сети используются выражения (3.1) – (3.6) без участия весовых функций  $h, l, \lambda, \mu, p$ .

Решение задачи разбиения графа (будем называть её глобальной) включает решение двух частных задач:

- задача выделения подграфа АРЗ для произвольно выбранной дуги графа, или задача локализации АРЗ для произвольно выбранного трубопровода;
- задача выделения из подграфа АРЗ подмножества существенных задвижек.

При решении глобальной задачи на конечный результат влияют только существенные задвижки. Во избежание ошибок, связанных с разбиением запорной арматуры на существенную и несущественную, рекомендуется в математической модели (3.1) – (3.6) учитывать всю имеющуюся в сети запорную арматуру. Корректное разбиение задвижек осуществляется автоматически в процессе решения частной задачи локализации аварийно-ремонтной зоны для произвольно взятого трубопровода.

На рис.3.9 изображена схема алгоритма решения глобальной задачи, производящей полное разбиение исходного графа сети на подграфы АРЗ и выделение в каждой АРЗ существенных задвижек.

В схеме алгоритма на рис.3.9 в блоке 4 вводится вспомогательное множество дуг графа ( $\Delta E$ ) и устанавливается начальное значение счётчика АРЗ.

В блоке 5 осуществляется произвольный выбор дуги из множества дуг графа сети, которые в процессе работы алгоритма ещё не охвачены уже сформированными АРЗ.

Блок 6 (подпрограмма локализации АРЗ для трубопровода  $e_{pq}$ ) при каждом циклическом выполнении формирует одну АРЗ.

Блок 7 (подпрограмма формирования множества существенных задвижек  $W$ ) определяет множество задвижек, которые отсекают АРЗ, сформированную в блоке 6, от остальной части сети. Сформированное множество задвижек  $W$ , с одной стороны, помогает отделить АРЗ от всей сети, а с другой стороны, позволяет визуально контролировать правильность разбиения.

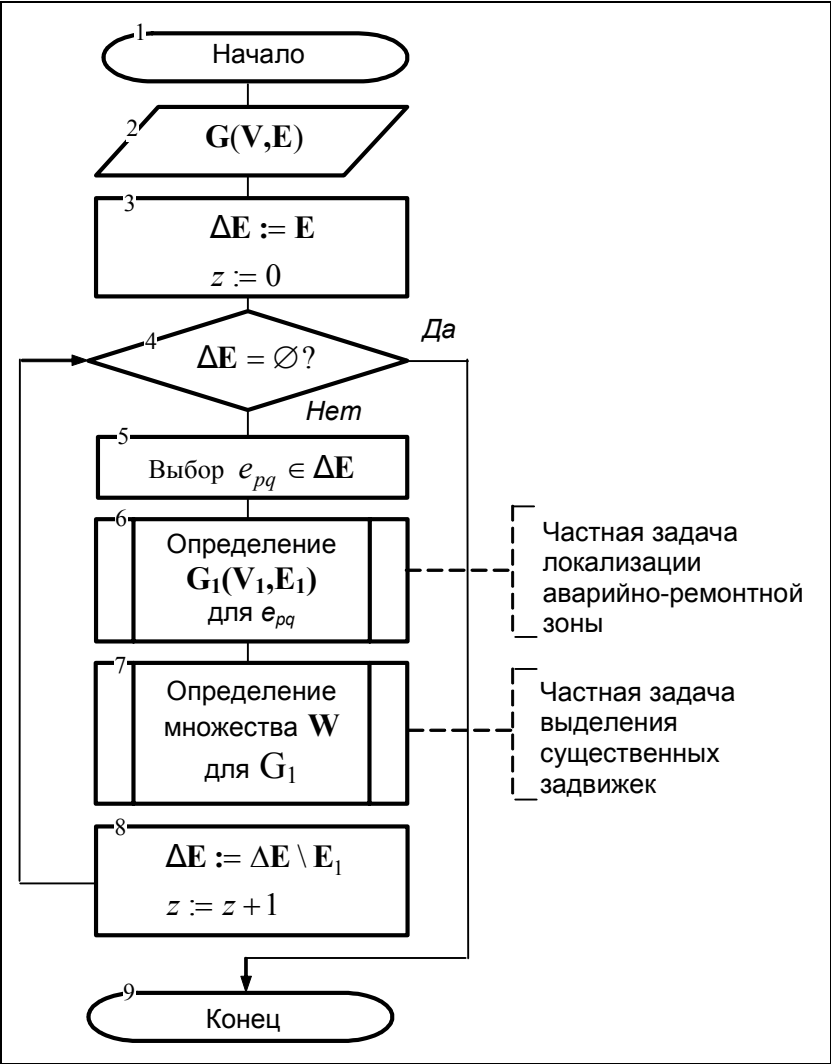


Рис.3.9 – Схема алгоритма решения глобальной задачи разбиения графа сети на подграфы аварийно-ремонтных зон

Блок 8 удаляет из вспомогательного множества  $\Delta E$  дуги очередного построенного подграфа  $AP3$  и увеличивает счётчик зон сети на единицу.

**Первая частная задача – задача локализации аварийно-ремонтной зоны  $AP3$  для произвольно взятого трубопровода.** Каждый трубопровод (дуга)  $e_{ij}$  входит в несколько зон (подграфов)  $G_r^{ij}$ ,  $r = \overline{1, m_{ij}}$ , которые могут быть отсечены от всей сети различными комбинациями существенных задвижек. Здесь  $m_{ij}$  – общее число таких зон у трубопровода  $e_{ij}$ . Самая большая зона – вся сеть без активных элементов. По крайней мере, одна из зон, пусть ею будет  $G_r^{ij} = G_1(V_1, E_1)$ , имеет наименьшее число потребителей (вершин):

$$card(V_1) = \min_r \{card V_r\}, \quad r = \overline{1, m_{ij}}. \quad (3.16)$$

Тогда задачу локализации  $AP3$  для конкретного трубопровода  $e_{ij}$  можно сформулировать следующим образом.

*Дано: математическая модель трубопроводной сети в виде связного графа (3.1); функция (3.6), определённая для каждой дуги графа; трубопровод  $e_{ij} \in E$ , для которого следует определить  $AP3$ .*

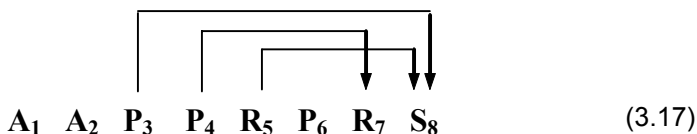
*Требуется определить подграф  $G_1(V_1, E_1) \subseteq G(V, E)$ , однозначно определяющий  $AP3$  трубопровода  $e_{ij}$  и удовлетворяющий требованию (3.16).*

Теоретически решение данной задачи может быть получено путем прямого перебора. Однако практически такой способ неосуществим из-за большой размерности задачи: граф городской водопроводной сети может насчитывать свыше тысячи дуг  $e_{ij}$ .

Решение данной задачи можно получить с помощью рекурсивного алгоритма локализации АРЗ, предложенного Самойленко Н.И. в [49]. Данный алгоритм оперирует только дугами графа сети, которые непосредственно сопрягаются с дугой  $e_{ij}$ . Это позволяет исключить из решения задачи подавляющее число дуг, а само решение сделать компактным, наглядным и простым, особенно при отслеживании решения с помощью компьютерной графики.

Решение задачи – искомым подграф  $G_1(V_1, E_1)$  – однозначно определяет не только АРЗ трубопровода  $e_{ij}$ , но и подготавливает данные для однозначного определения множества задвижек, перекрытие которых гарантирует прекращение доступа ЦП в АРЗ.

Алгоритм локализации АРЗ, т.е. определения графа  $G_1(V_1, E_1)$ , описывается операторной схемой

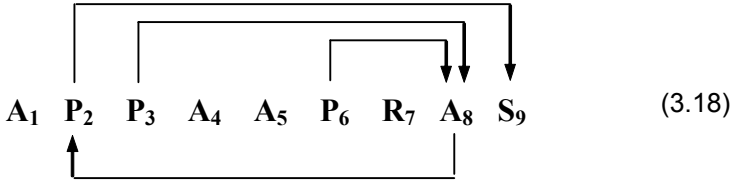


Здесь  $A_1$  – формирование начального подмножества  $E_1 = \{e_{pq}\}$ ;  $A_2$  – формирование начального подмножества  $V_1 = \{v_p, v_q\}$ ;  $P_3$  – анализ параметра весовой функции  $z_{pq}$ : если  $z_{pq} = 3$ , то искомым подграф  $G_1$  определяется начальными подмножествами  $E_1$  и  $V_1$  и осуществляется переход к оператору  $S_8$ , в противном случае выполняется следующий оператор;  $P_4$  – анализ параметра  $z_{pq}$ : если  $z_{pq} = 2$ , то управление передается рекурсивному подалгоритму  $R_7$  с фактическим параметром  $v_p$ , в противном случае управление получает рекурсивный подалгоритм  $R_5$  с фактиче-



ским параметром  $v_q$ ;  $R_5$  и  $R_7$  – рекурсивный подалгоритм доопределения подмножеств  $E_1$  и  $V_1$  с формальным параметром  $v_r$ ;  $P_6$  – анализ параметра  $z_{pq}$ : если  $z_{pq} = 1$ , то решение найдено и осуществляется переход к оператору  $S_8$ , в противном случае решение продолжает рекурсивный подалгоритм  $R_7$  с фактическим параметром  $v_p$ ;  $S_8$  – окончание решения.

В свою очередь рекурсивный подалгоритм  $R_5$  (он же  $R_7$ ) с формальным параметром  $v_r$  описывается операторной схемой



Здесь  $A_1$  – определение подмножества  $E_r^c = E_r \setminus E_1$ , что равносильно удалению из подмножества  $E_r$  ранее обработанных элементов (дуг);  $P_2$  – анализ подмножества  $E_r^c$ : если  $E_r^c = \emptyset$ , то подалгоритм завершает свою работу; если  $E_r^c \neq \emptyset$ , то начинается циклическая обработка дуг из подмножества  $E_r^c$ ;  $P_3$  – анализ параметра  $z_{ij}$  произвольно выбранной дуги  $e_{ij} \in E_r^c$  и её направления:

если  $z_{ij} = 3 \vee z_{ij} = 2 \wedge e_{ij} \in E_r^+$   $\vee z_{ij} = 1 \wedge e_{ij} \in E_r^-$ , то осуществляется переход к последнему оператору цикла, в противном случае выполняется следующий оператор;  $A_4$  – модификация подмножества  $E_1 := E_1 \cup e_{ij}$ ;  $A_5$  – модификация подмножества

$V_1 := V_1 \cup v_j$ ;  $P_6$  – анализ параметра  $z_{ij}$  выбранной дуги: если  $z_{ij} \neq 0$ , то производится рекурсивный вызов  $R_7$  излагаемого подалгоритма с фактическим параметром  $v_r (r = i \vee r = j, i \neq j)$ ;  $A_8$  – модификация подмножества  $E_r^c := E_r^c \setminus e_{ij}$  и переход к начальному оператору цикла;  $S_9$  – завершение работы подалгоритма.

Алгоритмы (3.17) и (3.18) соответствуют вычислимой функции

$$f(e_{pq}) = \begin{cases} G_0, & \text{если } z_{pq} = 3; \\ R(G_0, v_p), & \text{если } z_{pq} = 2; \\ R(G_0, v_q), & \text{если } z_{pq} = 1; \\ R(R(G_0, v_p), v_q), & \text{если } z_{pq} = 0, \end{cases} \quad (3.19)$$

где

$$\forall e_{pq} \in E, \quad E_0 = \{e_{pq}\}, \quad V_0 = \{v_p, v_q\}, \quad G_0 = G(V_0, E_0); \quad (3.20)$$

$$R(G_1, v_r) = \begin{cases} G_1, & \text{если } v_r \in V_1 \vee \text{card } E_r^c = 0; \\ R(Q(G_1, e_{ij}), v_r), & e_{ij} \in E_r^c, \quad i = r \vee j = r, \\ & i \neq j, \quad \text{если } \text{card } E_r^c > 1; \\ Q(G_1, e_{ij}), & e_{ij} \in E_r^c, \quad i = r \vee j = r, \\ & i \neq j, \quad \text{если } \text{card } E_r^c = 1, \end{cases} \quad (3.21)$$

$$Q(G_1, v_r) = \begin{cases} G_1, & \text{если } z_{ij} = 3 \vee z_{ij} = 1 \wedge e_{ij} \in E_r^- \vee \\ & \vee z_{ij} = 2 \wedge e_{ij} \in E_r^+; \\ G_1 \cup G_{ij}, & \text{если } z_{ij} = 1 \wedge e_{ij} \in E_r^+ \vee \\ & \vee z_{ij} = 2 \wedge e_{ij} \in E_r^-; \\ G_1 \cup G_{ij} \cup R(G_1, v_s \mid v_s \in \{v_i, v_j\}, v_s \neq v_r), & \\ & \text{если } z_{ij} = 0. \end{cases} \quad (3.22)$$

Здесь  $G_1 \cup G_{ij} \Leftrightarrow (V_1 \cup \{v_r\}, E_1 \cup e_{ij})$  при условии  $i = r \vee j = r$ .

При большой степени закольцованности сети (при высокой связности графа) рекурсивная обработка графа может вернуться в вершину, которая уже была обработана. При этом повторная циклическая обработка в (3.21) теряет смысл, хотя и не влияет на конечный результат. Чтобы аннулировать и тем самым уменьшить глубину рекурсии, необходимо модифицировать условие (3.21) следующим образом:

$$R(G_1, v_r) = \begin{cases} G_1, & \text{если } v_r \in V_1 \vee \text{card } E_r^c = 0; \\ R(Q(G_1, e_{ij}), v_r), & e_{ij} \in E_r^c, \quad i = r \vee j = r, \\ & i \neq j, \quad \text{если } v_r \notin V_1 \wedge \text{card } E_r^c > 1; \\ Q(G_1, e_{ij}), & e_{ij} \in E_r^c, \quad i = r \vee j = r, \\ & i \neq j, \quad \text{если } v_r \notin V_1 \wedge \text{card } E_r^c = 1. \end{cases} \quad (3.23)$$

Модификация (3.23) существенна для работы алгоритмов (3.17) и (3.18) в условиях ограниченной памяти ПК.

Выражения (3.19) – (3.23) представляют собой математическую модель процесса разбиения графа сети на подграфы АРЗ.

Решение задачи локализации АРЗ в графической среде *AutoCAD* позволяет диспетчерской службе визуально наблюдать процесс разбиения общего графа сети на подграфы АРЗ.

**Вторая частная задача – задача выделения из заданной аварийно-ремонтной зоны существенной запорной арматуры.** Задача выделения из подграфа АРЗ существенных задвижек не является основной для разбиения сети на подграфы АРЗ. Однако она имеет большое значение для служб эксплуатации сложных ТТС при проведении аварийных или профилактических работ, когда необходимо быстро отсечь АРЗ от всей сети. Ошибочное перекрытие не той задвижки или не перекрытие требуемой влечет за собой значительные материальные и трудовые потери, а порой и значительное ухудшение экологического состояния окружающей среды.

Задача выделения из заданной аварийно-ремонтной зоны существенной запорной арматуры формулируется следующим образом.

*Дано: математическая модель АРЗ в виде подграфа  $G_1(V_1, E_1)$  как результат решения предыдущей частной задачи (задачи локализации АРЗ) и функция (3.6), определённая для каждой дуги подграфа  $G_1(V_1, E_1)$ .*

*Требуется определить множество существенных задвижек  $W$ , которые гарантированно отсекают аварийно-ремонтную зону, соответствующую подграфу  $G_1(V_1, E_1)$ , от остальной части сети.*

Решение данной задачи сводится к определению множества  $W$  граничных задвижек заданной АРЗ, т.е. к выделению всех существенных задвижек из подграфа  $G_1$ , полученного в результате решения задачи локализации АРЗ.

Для описания алгоритма определения множества **W** введем следующие подмножества:

– подмножество исходящих и входящих дуг  $\mathbf{E}_i$ , инцидентных вершине  $v_i$ ,

$$\mathbf{E}_i = \mathbf{E}_i^- \cup \mathbf{E}_i^+; \quad (3.24)$$

– подмножество  $\mathbf{E}_i^1$ , в котором каждый элемент соответствует трубопроводу колодца (вершины)  $v_i$ , не имеющего запорной арматуры в этом колодце, т.е.

$$\mathbf{E}_i^1 = \{e_{ij} \mid e_{ij} \in \mathbf{E}_i^- \wedge z_{ij} = 2 \vee e_{ij} \in \mathbf{E}_i^+ \wedge z_{ij} = 1\}; \quad (3.25)$$

– подмножество  $\mathbf{E}_i^2$ , в котором каждый элемент соответствует трубопроводу колодца (вершины)  $v_i$ , принадлежащему АРЗ, т.е.

$$\mathbf{E}_i^2 = \mathbf{E}_i \cap \mathbf{E}_1; \quad (3.26)$$

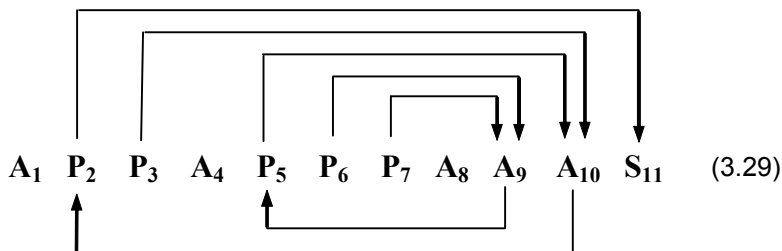
– подмножество  $\mathbf{E}_i^3$ , в котором каждый элемент соответствует трубопроводу колодца (вершины)  $v_i$ , не принадлежащему АРЗ, т.е.

$$\mathbf{E}_i^3 = \mathbf{E}_i \setminus \mathbf{E}_1; \quad (3.27)$$

– подмножество  $\mathbf{E}_i^4$ , в котором каждый элемент соответствует трубопроводу колодца (вершины)  $v_i$ , принадлежащему АРЗ и не имеющему запорной арматуры в этом колодце, т.е.

$$\mathbf{E}_i^4 = \mathbf{E}_i^2 \setminus \mathbf{E}_i^1. \quad (3.28)$$

Операторная схема алгоритма определения множества **W** соответствует следующей схеме:



Здесь  $A_1$  – формирование начального пустого множества задвижек  $\mathbf{W} = \emptyset$ ;  $P_2$  – анализ множества вершин подграфа  $G_1$ : если  $V_1 = 0$ , то все вершины исходного множества  $V_1$  уже обработаны, множество  $\mathbf{W}$  окончательно сформировано и следует перейти к оператору завершения алгоритма  $S_{11}$ , в противном случае начинается цикл по обработке произвольного элемента  $v_i \in V_1$ ;  $P_3$  – анализ дуг, инцидентных вершине  $v_i$ : если  $E_i^3 = \emptyset$ , то все трубопроводы колодца  $v_i$  принадлежат АРЗ и следует сразу же перейти к конечному оператору цикла  $A_{10}$ , в противном случае выполняется следующий оператор;  $A_4$  – ввод вспомогательного множества  $\mathbf{M} = E_1$ ;  $P_5$  – анализ подмножества  $\mathbf{M}$ : если  $\mathbf{M} = \emptyset$ , то все дуги  $e_{ij}$ , инцидентные вершине  $v_i$ , обработаны и следует перейти к оператору  $A_{10}$ , в противном случае начинает выполняться встроенный цикл по обработке произвольного элемента  $e_{ij} \in \mathbf{M}$ ;  $P_6$  – анализ дуги  $e_{ij}$ : если  $e_{ij} = E_i^2 \wedge E_i^4 \neq \emptyset$ , то все трубопроводы колодца  $v_i$ , принадлежащие АРЗ, имеют запорную арматуру и следует сразу же перейти к конечному оператору встроенного цикла  $A_9$ , иначе начинают выполняться операторы встроенного цикла;  $P_7$  – анализ дуги  $e_{ij}$ : если  $e_{ij} = E_i^3 \wedge E_i^4 \neq \emptyset$ , то хотя бы один из трубопроводов, принадлежащих АРЗ, не имеет запорной арматуры, а все не принад-

лежащие – имеют, то следует перейти на конечный оператор встроенного цикла, в противном случае выполняется следующий оператор;  $A_8$  – модификация подмножества  $\mathbf{W} := \mathbf{W} \cup \{e_{ij}, v_i\}$ ;  $A_9$  – модификация подмножества  $\mathbf{M} := \mathbf{M} \setminus e_{ij}$  и переход на начало встроенного цикла  $P_4$ ;  $A_{10}$  – модификация подмножества  $\mathbf{V}_1 := \mathbf{V}_1 \setminus v_i$  и переход на начало внешнего цикла  $P_2$ ;  $S_{11}$  – окончание решения.

Алгоритму (3.29) соответствует вычислимая функция

$$\mathbf{W}(\mathbf{G}_1 = (\mathbf{E}_1 \setminus \mathbf{V}_1)) = \bigcup_{v_i \in \mathbf{V}_1} \mathbf{W}(\mathbf{V}_i), \quad (3.30)$$

где

$$\mathbf{W}(\mathbf{V}_i) = \begin{cases} \emptyset, & \text{если } \mathbf{E}_i^3 = \emptyset; \\ \bigcup_{e_{ij} \in \mathbf{E}_i^2} \{e_{ij}, v_i\}, & \text{если } \mathbf{E}_i^3 \neq \emptyset \wedge \mathbf{E}_i^4 \neq \emptyset; \\ \bigcup_{e_{ij} \in \mathbf{E}_i^3} \{e_{ij}, v_i\}, & \text{если } \mathbf{E}_i^3 \neq \emptyset \wedge \mathbf{E}_i^4 = \emptyset. \end{cases} \quad (3.31)$$

Выражения (3.30) и (3.31) представляют собой математическую модель процесса формирования из заданного подграфа  $\mathbf{G}_1$  множества  $\mathbf{W}$ , которое определяет место положения на сети запорной арматуры, отсекающей соответствующую АРЗ от этой сети.

### 3.5.3. Расчет технической надёжности аварийно-ремонтных зон

Исходными данными для решения задачи по определению надёжности функционирования АРЗ  $\mathbf{Z}_k$  ( $k = \overline{1, z}$ ) в общем случае являются подграфы АРЗ в количестве  $z$  и множества  $\mathbf{W}_k$  существенных задвижек для каждой  $k$ -й зоны ( $k = \overline{1, z}$ ), полученные в результате решения глобальной задачи разбиения исходного графа; весовые функции  $h, z, l, \lambda, \mu, \mathbf{p}$ .

Как было изложено ранее, техническую надёжность каждой зоны  $P_{\mathbf{Z}_k}$  можно рассчитать четырьмя методами:

– *аналитическим* методом с помощью выражения (3.8), которое в данном случае принимает вид

$$P_{\mathbf{Z}_k} = \left( \prod_{i=1}^{t_k} p_i \right) \cdot \left( \prod_{i=t+1}^{t_k+z_k} p_i \right) = \prod_{i=1}^{t_k+z_k} p_i, \quad (3.32)$$

где  $t_k$  – количество дуг (трубопроводов) в графе АРЗ  $\mathbf{Z}_k$ ;  $z_k$  – количество задвижек в зоне  $\mathbf{Z}_k$ ;

– *статистическим* методом с использованием формулы (3.9);

– *статистико-аналитическими* методами теории массового обслуживания на основе использования выражений (3.10) и (3.11).

Выбор метода зависит от обстоятельств, при которых требуется произвести расчёт технической надёжности. Так, при проектировании новых сетей использование статистического метода нецелесообразно по причине отсутствия статистических данных. При эксплуатации сети в течение  $5 \div 20$  лет предпочтение следует отдавать статистико-аналитическим методам. При длительной эксплуатации сети в течение более 20 лет наиболее точные результаты обеспечивает статистический метод.



### 3.5.4. Построение взвешенного графа аварийно-ремонтных зон

Два предыдущих этапа подготавливают исходные данные для задачи построения взвешенного графа АРЗ. Так, этап разбиения исходного графа на подграфы АРЗ предоставляет текущему этапу следующие данные:

- подграф аварийно-ремонтной зоны, эквивалентный подграфу  $G_1(V_1, E_1)$ , который является результатом решения первой частной задачи разбиения при произвольном выборе 1-й дуги из исходного множества дуг  $E$ ;

- подграф  $Z_2$ , эквивалентный подграфу  $G_1(V_1, E_1)$  при произвольном выборе 2-й дуги из множества дуг  $E_{1_2} = E \setminus E_1$ ;

- подграф  $Z_3$ , эквивалентный подграфу  $G_1(V_1, E_1)$  при произвольном выборе 3-й дуги из множества дуг  $E_{1_3} = E_{1_2} \setminus E_1$ ;

...

- подграф  $Z_z$ , эквивалентный подграфу  $G_1(V_1, E_1)$  при произвольном выборе  $z$ -й дуги из множества дуг  $E_{1_z} = E_{1_{z-1}} \setminus E_1$ ;

- множество существенных задвижек  $W_1$  в подграфе  $Z_1$ , эквивалентное множеству задвижек  $W$ , которое является решением второй частной задачи разбиения;

- аналогичное множество  $W_2$  в подграфе  $Z_2$ ;

...

- аналогичное множество  $W_z$  в подграфе  $Z_z$ ;

- величина  $z$ , соответствующая конечному значению счётчика АРЗ (см. алгоритм решения глобальной задачи разбиения на рис.3.9).

Этап расчёта технической надёжности АРЗ предоставляет численные значения  $P_{Z_1}, P_{Z_2}, \dots, P_{Z_k}, \dots, P_{Z_z}$ , определяющие работоспособность  $k$ -й зоны.

Для каждой существенной задвижки из множества  $\bigcup_{k=1}^z w_k$  должна быть известна вероятность  $p_a$  безотказной работы за определённый период времени  $T$ .

По приведенным исходным данным строится взвешенный граф

$$Z[p, p_a] = (V_z, E_z; p, p_a), \quad (3.33)$$

где  $V_z$  – множество вершин графа, соответствующих источнику ЦП (0-я вершина) и аварийно-ремонтным зонам,  $V_z = \{v_k\}_0^z$ ;  $E_z$  – множество дуг графа, соответствующих существенной запорной арматуре, которая объединяет источник ЦП и АРЗ в единую сеть,  $E_z = \{e_{ij} = (v_i v_j) \mid i, j = \overline{0, z}, i \neq j\}$ ;  $z$  – количество АРЗ в сети;  $p$  – весовая функция на вершинах графа, определяющая техническую надёжность соответствующей АРЗ;  $p_a$  – весовая функция на дугах графа, определяющая техническую надёжность соответствующей запорной арматуры.

Построение графа начинается с 0-й вершины (источника ЦП), которая имеет только исходящие дуги. Запорная арматура (задвижки) на исходящих дугах укажет на те АРЗ, которые стыкуются с источником ЦП. Для каждой такой АРЗ строится вершина с индексом, равным номеру зоны. Исходящие дуги из построенных вершин АРЗ, которым в исходном графе сети соответствуют существенные задвижки, укажут на следующие АРЗ, которые уже не стыкуются с источником ЦП. Процесс построения продолжается до тех пор, пока всем зонам в количестве  $z$  ни будут соответствовать вершины в том же количестве. Направление дуг совпадает с направлением потока ЦП в соответствующей запорной арматуре. Если в процессе построения исходящая дуга укажет на зону, для которой вершина уже построена, то дугу направляют на построенную вершину, и новая вершина не строится.

Сформированный граф рекомендуется проверить на количество вершин и дуг:

- количество вершин должно быть равно величине  $z + 1$  (количество АРЗ плюс источник ЦП);
- количество дуг  $\text{card Ez}$  должно соответствовать количеству существенных задвижек сети  $\text{card} \bigcup_{k=1} \mathbf{W}_k$ .

Упрощение графа АРЗ  $\mathbf{Z}[p, p_a]$ , т.е. замена параллельных дуг при их наличии одной дугой (однонаправленной или двунаправленной), производится только после проведения контроля количества дуг и вершин в графе.

Результатом выполнения этапа является упрощенный граф АРЗ  $\mathbf{Z}_{\text{упр}}[p, p_a]$ .

### 3.5.5. Построение расчётных моделей функциональной надёжности сети

Разобьём множество индексов  $\{k\}_1^z$  аварийно-ремонтных зон  $\mathbf{Z}_k$  на два подмножества  $\{k\}_1^{z_c}$  и  $\{k\}_{z_c+1}^z$ . Пусть первое множество включает индексы тех АРЗ, которые стыкуются с источником ЦП. При этом общее число зон, которые стыкуются с источником, составит  $z_c$ . Тогда остальные зоны, не имеющие стыковки с источником ЦП, в количестве  $(z - z_c)$  будут иметь индексы, принадлежащие второму множеству. Такое разбиение можно осуществить всегда. Если нумерация зон не позволяет произвести указанное разбиение, то зоны следует перенумеровать. При перенумерации необходимо обеспечить условие: первые индексы в количестве  $z_c$  должны принадлежать зонам, непосредственно стыкующимся с источником ЦП.

Этап построения расчётных моделей функциональной надёжности для каждой аварийно-ремонтной зоны производится отдельно. При этом построение расчётных моделей для первых зон

$Z_k$  с индексами от 1 до  $z_c$  не представляет особого интереса из-за своей очевидности и простоты. Каждая  $k$ -я расчётная модель будет состоять только из двух вершин, одна из которых соответствует источнику ЦП, другая – зоне  $Z_k$ . Для сохранения целостности изложения будем считать, что расчётные модели и для них также построены.

Для АРЗ, которые не стыкуются непосредственно с источником ЦП, расчётная модель строится в обязательном порядке. Вся информация, необходимая для построения расчётных моделей, содержится во взвешенном графе АРЗ  $Z_{\text{упр}}[p, p_a]$ , и сами расчётные модели представляют собой взвешенные подграфы  $Z_{f_k}[p, p_a]$  ( $k = \overline{1, z}$ ):  $Z_{f_k}[p, p_a] \subseteq Z_{\text{упр}}[p, p_a]$ .

В процессе построения  $k$ -й расчётной модели следует соблюдать следующие правила:

- каждая  $k$ -я расчётная модель имеет начальную 0-ю вершину (источник ЦП) и конечную с индексом  $k$ , которой соответствует  $k$ -я АРЗ;
- каждая  $k$ -я модель должна включать все альтернативные варианты поступления ЦП от источника в  $k$ -ю АРЗ;
- направления дуг в модели должно совпадать с направлением дуг в графе  $Z_{\text{упр}}[p, p_a]$ ;
- если направления потоков показывают, что какая-то зона не является транзитной для  $k$ -й АРЗ, то её исключают из расчётной модели;
- двунаправленная дуга в транзитных зонах заменяется однонаправленной дугой, ориентированной от источника ЦП в сторону  $k$ -й АРЗ.

В результате выполнения этапа упрощенный граф АРЗ  $Z_{\text{упр}}[p, p_a]$  преобразуется в систему расчётных моделей:

$$\mathbf{Z}_{\text{упр}}[p, p_a] \Rightarrow \begin{cases} \mathbf{Z}_{f_1}[p, p_a]; \\ \mathbf{Z}_{f_2}[p, p_a]; \\ \dots \\ \mathbf{Z}_{f_z}[p, p_a]. \end{cases} \quad (3.34)$$

### 3.5.6. Анализ и коррекция расчётных моделей

Анализ каждой  $k$ -й расчётной модели в (3.34) производится с целью выявления и удаления из неё несущественных связей между вершинами (аварийно-ремонтными зонами) и самих вершин (зон), которые не влияют на функциональную надёжность сети относительно  $k$ -й АРЗ.

Выполнение данного этапа должно осуществляться специалистами, владеющими основами теории надёжности. Данный этап трудно поддается формализации. Компьютерную (программную) реализацию этапа следует производить в интерактивном режиме. Любое удаление элемента (связи или вершины) должно сопровождаться подтверждением специалиста (диспетчером, экспертом или другим компетентным лицом).

При анализе расчётных моделей и удаления несущественных элементов из них рекомендуется использовать приёмы, используемые в гипотетическом примере в п.3.4.

В результате выполнения данного этапа система расчётных моделей (3.34) преобразуется в новую систему расчётных моделей:

$$\begin{matrix} \mathbf{Z}_{f_1}[p, p_a]; \\ \mathbf{Z}_{f_2}[p, p_a]; \\ \dots \\ \mathbf{Z}_{f_z}[p, p_a], \end{matrix} \Rightarrow \begin{cases} \mathbf{Z}'_{f_1}[p, p_a]; \\ \mathbf{Z}'_{f_2}[p, p_a]; \\ \dots \\ \mathbf{Z}'_{f_z}[p, p_a], \end{cases} \quad (3.35)$$

где  $\mathbf{Z}'_{f_k}[p, p_a] \subseteq \mathbf{Z}_{f_k}[p, p_a]$   $k = \overline{1, z}$ .

### 3.5.7. Расчет функциональной надёжности сети

Расчет функциональной надёжности сети относительно АРЗ  $P_{Xk}^f (k = \overline{1, z})$  и функциональной надёжности сети относительно потребителей  $k$ -й зоны  $P_{Zk}^f (k = \overline{1, z})$  является последним этапом в методе расчёта функциональной надёжности [10].

Исходными данными для выполнения этапа являются:

– взвешенные графы (расчётные модели надёжности) без конечной вершины  $Z'_{fk} [p, p_a] \setminus Z_k, k = \overline{1, z}$ ;

–  $p$  – весовая функция, которая каждой вершине графа  $Z'_{fk}$  ставит в соответствие величину  $P_{Z_k}$ , полученную на 3-м этапе расчета и определяющую техническую надёжность  $k$ -й зоны;

–  $p_a$  – весовая функция, которая каждой дуге графа  $Z'_{fk}$  ставит в соответствие величину  $p_{ki}$ , равную технической надёжности  $i$ -й запорной арматуры  $k$ -й зоны;

–  $z$  – количество АРЗ в сети;

–  $z_c$  – количество зон, которые стыкуются с источником ЦП;

–  $\left[ \left( \bigcup_{i=1}^z W_k \right) - \Delta a_k \right]$  – количество дуг в графе  $Z'_{fk} [p, p_a]$ , где  $\Delta a_k$  – количество удаленных несущественных и упрощенных дуг в графе  $Z_{fk} [p, p_a]$ .

Расчет функциональной надёжности сети относительно  $k$ -й зоны АРЗ  $P_{Zk}^f$  для каждой расчётной модели  $Z'_{fk} [p, p_a]$  производится по методике расчёта надёжности технических систем со смешанным (последовательным и параллельным) соединением элементов. Порядок расчёта отражен на схеме алгоритма (рис.3.10).

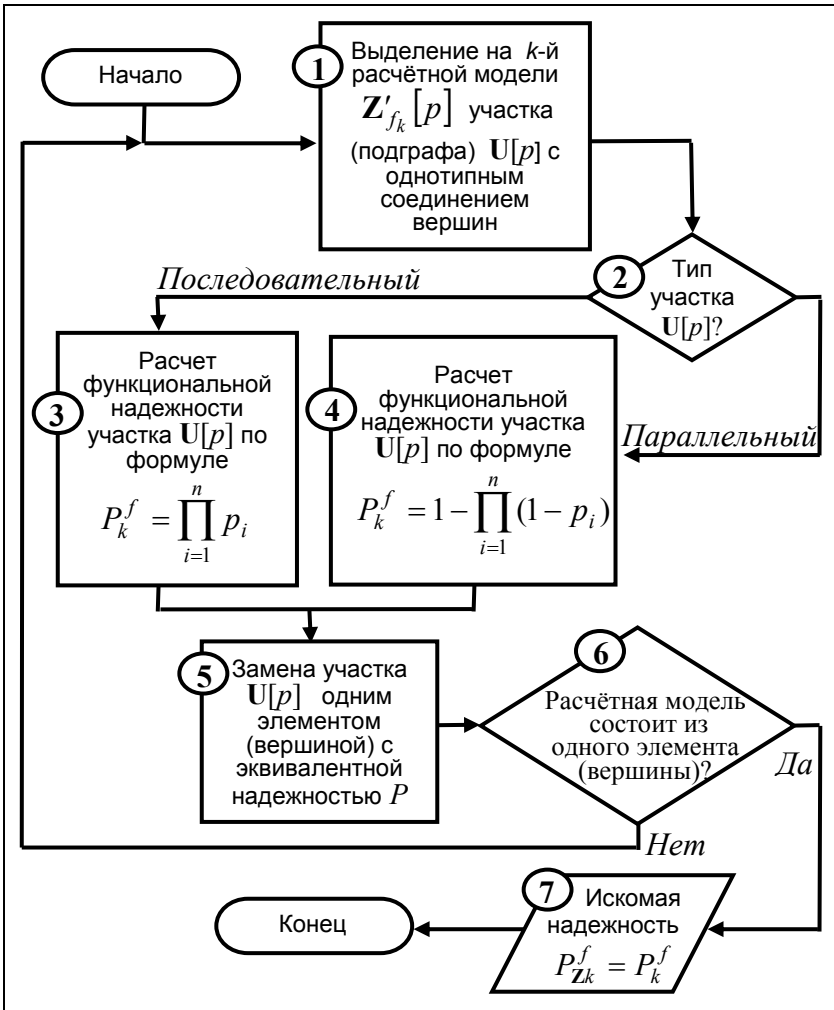


Рис.3.10 – Схема алгоритма расчета надежности системы со смешанным соединением элементов

Как следует из алгоритма, расчет функциональной надёжности по расчётным моделям представляет собой циклический процесс замены участков графа  $Z'_{fk} [p, p_a] \setminus Z_k$  с однотипным соединением вершин одним элементом с эквивалентной надёжностью, рассчитанной по формуле (1.1) в случае последовательного соединения или по формуле (1.2) в случае параллельного соединения вершин.

Циклический процесс замены продолжается до тех пор, пока граф не будет включать только один элемент (вершину). Рассчитанная эквивалентная надёжность этого элемента и будет являться искомой функциональной надёжностью сети относительно  $k$ -й зоны

$$P_{Zk}^f = P_k^f, \quad k = \overline{z+1, z_c}. \quad (3.36)$$

Величина  $P_{Xk}^f$  показывает, с какой вероятностью трубопроводная сеть обеспечивает поступление ЦП от источника в  $k$ -ю АРЗ. С точки зрения потребителей, наиболее привлекательными являются зоны со значениями  $P_{Xk}^f$ , близкими к единице. Поэтому при всех равных прочих условиях АРЗ, которые стыкуются с источником ЦП, являются наиболее надёжными.

С учетом АРЗ, которые имеют стыковку с источником ЦП, выражение (3.36) примет вид

$$P_{Zk}^f = \begin{cases} P_{Zk} \cdot \prod_{i=1}^{aard \mathbf{W}_k} p_{ki}, & k = \overline{1, z}; \\ P_k^f, & k = \overline{z+1, z_c}. \end{cases} \quad (3.37)$$

Выражение (3.37) является конечным искомым результатом разработанного авторами метода расчёта функциональной надёжности ТТС.



Анализ выражения (3.37) позволяет сделать важные выводы касательно проблемы повышения функциональной надёжности сети, а именно:

- функциональную надёжность сети относительно потребителей аварийно-ремонтной зоны, которая стыкуется с источником ЦП, можно повысить только за счёт увеличения технической надёжности этой зоны, т.е. за счёт разделения зоны на две и более зоны (с меньшей протяженностью трубопроводов) путём ввода новых существенных задвижек;

- функциональную надёжность сети относительно потребителей зон, которые не стыкуются с источником ЦП, можно повысить за счёт увеличения технической надёжности этой зоны или за счёт увеличения функциональной надёжности сети относительно этой же зоны.

Второй вывод касается общего случая, поэтому повышение надёжности для зон, не стыкующихся с источником питания, заслуживает особого внимания.

Для зон, в которые ЦП от источника попадает, минуя другие зоны, повышение надёжности может быть достигнуто и за счёт дробления АРЗ, и за счёт структурных изменений сети, а именно: закольцовывания сети, увеличения числа альтернативных путей доставки ЦП от источника в зону и пр.

*Замечание.* Функциональная надёжность сети относительно потребителей одной и той же зоны, рассчитанная по формуле (3.37), учитывает только свойства самой распределительной сети. Для учёта всей трубопроводной системы необходимо расчётные значения функциональные надёжности скорректировать, умножив их на техническую надёжность источника ЦП.

## РАЗДЕЛ 4

### **ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ НАДЁЖНОСТЬ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ**

Предложенный в предыдущем разделе метод расчёта функциональной надёжности для распределительных сетей в трубопроводных транспортных системах с полным правом может быть применён для расчёта функциональной надёжности магистральных сетей. Однако резкое отличие в расстояниях от источника до потребителя, которое для магистральных систем больше на 2 – 3 порядка, требует дополнительных исследований. Данный раздел ориентирован на исследование проблемы функциональной надёжности в магистральных сетях высокой протяженности и сравнительный анализ функциональной надёжности таких сетей при различных конструктивных решениях.

#### **4.1. Особенности магистральных трубопроводных транспортных систем и способы повышения их функциональной надёжности**

Трубопроводные транспортные системы в своём составе могут иметь трубопроводы повышенной протяженности. В качестве таковых могут выступать следующие участки напорных сетей:

- обычный трубопровод к отдалённому потребителю;
- отводные коллекторы, поставляющие отработанную воду на удалённые загородные очистные сооружения;
- водопроводы от заборных сооружений до городской распределительной сети;
- газопроводы от добывающих скважин до газораспределительных пунктов;

- воздуховоды от компрессорной станции до отдаленных объектов потребления;
- практически все трубопроводные участки магистральных транспортных систем.

Независимо от того, какой целевой продукт (газ, вода, нефть, тепло, сжатый воздух, сыпучие материалы и т.п.) транспортируется системой, все протяженные трубопроводные участки должны обладать повышенной надёжностью. Выход из строя такого участка в распределительных сетях приводит к тому, что сеть перестаёт отвечать своему назначению и становится объектом повышенной опасности, способной вызвать экологическую катастрофу. В магистральных сетях выход из строя такого участка усугубляется ещё и масштабами потерь и ущербов.

В дальнейшем все участки повышенной протяженности распределительных и магистральных сетей будем называть магистральными трубопроводами.

Магистральные трубопроводы попадают в противоречивую ситуацию. С одной стороны, к ним предъявляется требование повышенной надёжности в силу их высокой значимости для функционирования всей системы и повышенной опасности для окружающей среды. А с другой стороны, согласно выражению (2.20) магистральные трубопроводы обречены на низкую надёжность из-за их протяжённости: чем больше длина трубопровода, тем меньше его надёжность.

В связи с противоречивостью ситуации возникает острая необходимость в разработке методов повышения функциональной надёжности магистральных систем. Одним из очевидных методов повышения функциональной надёжности магистральных систем является дублирование их трубопроводов, т.е. сооружение двух параллельных ниток трубопроводов.

Схема магистральной трубопроводной системы, состоящей из двух параллельных трубопроводов, показана на рис.4.1. Поскольку оба параллельных трубопровода, как правило, сооружаются в одно и то же время, имеют одинаковый материал, длину и диаметр, то они должны иметь и равную техническую надёжность. Поскольку в общем случае перечисленные условия сооружения трубопроводов могут быть нарушены, то будем считать, что соот-

ветствующие технические надёжности могут отличаться друг от друга.

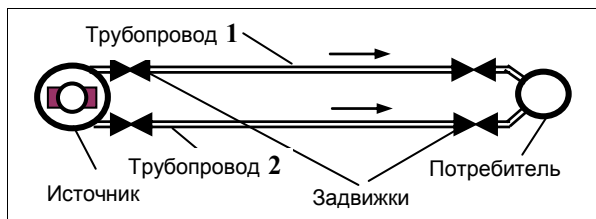


Рис.4.1 – Схема дублирования магистрального трубопровода

Если положить, что техническая надёжность всех задвижек на схеме рис.4.1 намного выше технической надёжности трубопроводов, то расчётная модель функциональной надёжности, соответствующая такой ТТС, будет иметь вид, изображенный на рис.4.2. Здесь  $p_1, p_2$  – технические надёжности 1-го и 2-го трубопроводов.

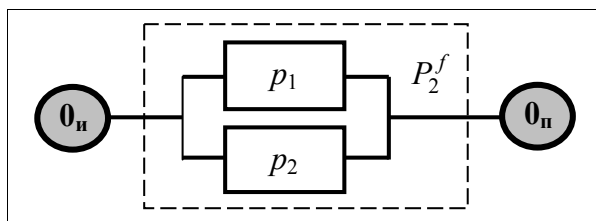


Рис.4.2 – Расчётная модель функциональной надёжности сети с двумя параллельными трубопроводами

Функциональная надёжность трубопроводной сети из двух параллельных трубопроводов, согласно формуле (1.2), определится выражением

$$P_2^f = 1 - \prod_{i=1}^2 (1 - p_i) = 1 - (1 - p_1)(1 - p_2). \quad (4.1)$$

Для трубопроводной сети, состоящей из трёх трубопроводов, эта же надёжность определится выражением

$$P_3^f = 1 - \prod_{i=1}^3 (1 - p_i) = 1 - (1 - p_1)(1 - p_2)(1 - p_3). \quad (4.2)$$

Табл.4.1 показывает эффект повышения функциональной надёжности сети за счёт резервирования трубопровода при различных значениях технической надёжности трубопровода  $p_1$ . В таблице величина  $k^f$ , коэффициент повышения надёжности, показывает во сколько раз увеличилась функциональная надёжность за счёт резервирования трубопровода. Данные в таблице получены в предположении, что  $p_1 = p_2 = p_3$ , т.е. параллельные трубопроводы имеют равную длину, диаметр, материал изготовления и время ввода в эксплуатацию.

Таблица 4.1

Техническая надёжность трубопровода $p_1$	Два параллельных трубопровода		Три параллельных трубопровода	
	$P_2^f = 1 - (1 - p)^2$	$k^f$	$P_3^f = 1 - (1 - p)^3$	$k^f$
0,01	0,0199	1,99	0,0297	2,97
0,1	0,19	1,9	0,271	2,71
0,3	0,51	1,7	0,657	2,19
0,5	0,75	1,5	0,875	1,75
0,7	0,91	1,3	0,973	1,39
0,9	0,99	1,1	0,999	1,11
0,99	0,9999	1,01	0,999999	1,0101

Как видно из табл.4.1, функциональная надёжность за счёт дублирования трубопровода может быть увеличена не более, чем в 2 раза, за счёт двукратного резервирования (три нитки трубопроводов) – не более, чем в 3 раза. При высокой технической надёжности трубопроводов ( $p_1 = p_2 = p_3 \approx 1$ ) эффект повышения функциональной надёжности не наблюдается.

Дальнейшее эффективное повышение надёжности параллельно проложенных трубопроводов достигается с помощью сооружения перемычек между ними. Ввод коротких перемычек, обладающих высокой технической надёжностью из-за их малой длины, позволяет не только повысить их функциональную надёжность, но и обеспечить условия для профилактических и ремонтных работ, не прекращая при этом транспортировку ЦП потребителю.

На рис.4.3 схематично показано устройство перемычки. На рисунке перемычка разбивает два параллельных трубопровода на 4 участка 1, 2, 3 и 4. Каждый участок может быть отсечен от магистральной сети с помощью пары задвижек на концах соответствующего трубопровода. При этом целевой продукт продолжает поступать к потребителю через оставшиеся работоспособные участки. Кроме того, перемычка позволяет также проводить аварийно-профилактические работы на двух участках без прекращения поставки ЦП потребителю. Так, 1-й или 2-й участок может быть одновременно отключен с 3-м или 4-м участком.

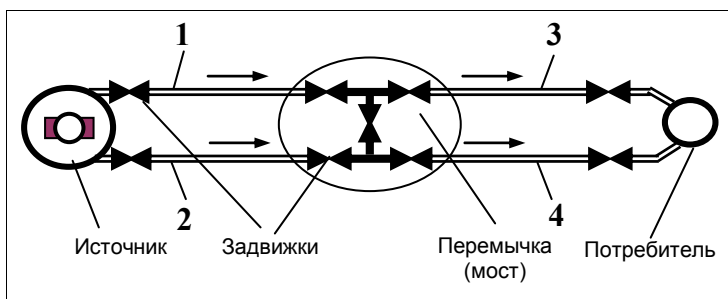


Рис.4.3 – Устройство перемычки

Установка перемычки приводит к мостовой конструкции трубопроводов и способствует повышению функциональной надёжности магистральной сети в целом. Мостовые соединения являются достаточно эффективным способом повышения надёжности трубопроводных систем, поскольку сооружение дешевой короткой перемычки намного предпочтительнее, чем строительство дополнительной третьей нитки трубопровода.

На рис.4.4 приведена расчётная модель функциональной надёжности сети, соответствующая ТТС с одной перемычкой (мостом) при условии, что все задвижки и сама перемычка за определённый период времени работают абсолютно безотказно. Здесь  $p_{ij}$  – техническая надёжность плеча моста (участка трубопровода),  $i = \overline{1,2}$ ,  $j = \overline{1,2}$ .

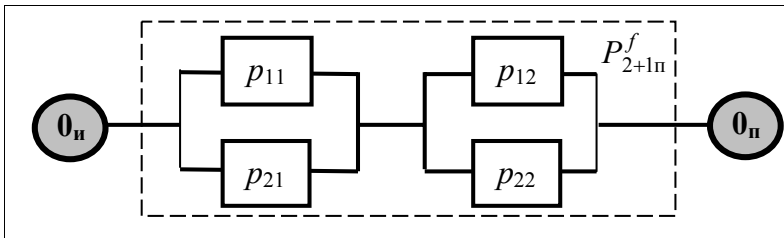


Рис.4.4 – Расчётная модель функциональной надёжности сети с мостовым соединением трубопроводов

Функциональная надёжность трубопроводной сети из двух параллельных трубопроводов, разделённых одной перемычкой, определяется выражением

$$P^f_{2+1п} = [1 - (1 - p_{11})(1 - p_{21})][1 - (1 - p_{12})(1 - p_{22})]. \quad (4.3)$$

Выражение (4.3) является математической моделью функциональной надёжности для системы трубопроводов с одним мосто-

вым соединением элементов при неравновесных плечах моста и перемычкой с технической надёжностью, равной единице.

Если положить, что все плечи моста равновесны, техническая надёжность перемычки равна единице, а техническая надёжность не разделённого перемычкой трубопровода равна  $p$ , то

$$p_{11} = p_{21} = p_{12} = p_{22} = 1 - \frac{1-p}{2} = \frac{1+p}{2}. \quad (4.4)$$

Равенство (4.4) вытекает из утверждения, что техническая ненадёжность трубопроводов пропорциональна их длинам. Поскольку каждое плечо моста по длине в 2 раза меньше, чем длина неразделённого трубопровода, то техническая ненадёжность каждого плеча будет в 2 раза меньше ненадёжности целого трубопровода. В соответствии с зависимостью (2.30) ненадёжность

каждого плеча составит  $\left(\frac{1-p}{2}\right)$ . Следовательно, техническая

надёжность как вероятность противоположного события составит  $\left(1 - \frac{1-p}{2}\right)$ , или  $\left(\frac{1+p}{2}\right)$ , что и указано в (4.4).

С учётом (4.4) выражение (4.3) принимает вид

$$P_{2+1M}^f = \left(\frac{3+2p-p^2}{4}\right)^2. \quad (4.5)$$

Интересным представляется сравнительный анализ функциональной надёжности системы, состоящей из двух параллельных трубопроводов с равной технической надёжностью  $p$ , при двух вариантах изменения структуры системы:

– первый вариант соответствует вводу третьего параллельного трубопровода;



– второй вариант соответствует установке одной перемычки между двумя параллельными трубопроводами.

В табл.4.2 приведены данные для сравнения обоих указанных вариантов. При этом в первом варианте предполагается, что третий трубопровод имеет техническую надёжность, также равную  $p$ . Функциональная надёжность всей магистральной сети в этом случае определится выражением

$$P_3^f = 1 - (1 - p)^3. \quad (4.6)$$

Во втором варианте предполагается, что перемычка симметрично делит два параллельных трубопровода на четыре равных по длине участка, т.е. имеет место равновесное мостовое соединение трубопроводов с технической надёжностью каждого плеча, определяемой выражением (4.4). Кроме того, предполагается, что надёжность перемычки  $p_m = 1$ . Функциональная надёжность такой магистральной сети определяется с помощью выражения (4.5)

Таблица 4.2

Техн. надёжн. трубопр. $p_1 = p_2 = p$	Три параллельных трубопровода (1-й вариант)		Два параллельных трубопровода с одной перемычкой (2-й вариант)	
	$P_3^f$	$k^f = \frac{P_3^f}{p}$	$P_{2+1M}^f$	$k^f = \frac{P_{2+1M}^f}{p}$
0,01	0,0297	2,97	0,5700	57,0
0,1	0,271	2,71	0,6360	6,36
0,3	0,657	2,19	0,7700	2,5667
0,5	0,875	1,75	0,8789	1,7578
0,7	0,973	1,39	0,9555	1,365
0,9	0,999	1,11	0,9950	1,1056
0,99	0,999999	1,0101	0,99995	1,0101

Как видно из табл.4.2, установка перемычки между двумя параллельными трубопроводами намного эффективнее сооружения третьего параллельного трубопровода в диапазоне малых значений технической надёжности  $p$  (от 0 до 0,5). В диапазоне значений  $p$  от 0,5 до 1 оба варианта изменения структуры приводят приблизительно к одинаковому повышению функциональной надёжности магистральной сети. Поскольку затраты на сооружение перемычки намного меньше сооружения третьего параллельного трубопровода, то 2-й вариант изменения структуры магистральной сети, безусловно, намного эффективнее 1-го.

Если между двумя параллельными трубопроводами с одинаковой технической надёжностью, равной  $p$ , установить две безотказные перемычки так, чтобы трубопроводы разделились на 6 равных по длине участков, то функциональная надёжность такой магистральной сети определится выражением

$$P_{2+2M}^f = \left( \frac{8 + 2p - p^2}{9} \right)^3. \quad (4.7)$$

Расчётные значения функциональной надёжности  $P_{2+2M}^f$ , соответствующие формуле (4.7), представлены в табл.4.3.

Анализ табл.4.3 показывает:

- ввод одной перемычки целесообразен при технической надёжности параллельных трубопроводов  $p \leq 0,9$ ;
- ввод двух перемычек целесообразен только при низкой технической надёжности параллельных трубопроводов, т.е. при  $p \leq 0,5$ ;
- при высокой начальной надёжности трубопроводов ( $p \geq 0,99$ ) даже сооружение второго параллельного трубопровода не даёт ощутимого эффекта: коэффициент усиления функциональной надёжности в этом случае составляет лишь 1,01.

Таблица 4.3

Техн. надёжн. трубопр. $p_1 = p_2 = p$	Два параллел. трубопр.		2параллел. трубопро- вода с 1-й перемычкой		2 параллел. трубопро- вода с 2-мя перемыч- ками	
	$P_2^f$	$k^f = \frac{P_2^f}{p}$	$P_{2+1M}^f$	$k^f = \frac{P_{2+1M}^f}{p}$	$P_{2+2M}^f$	$k^f = \frac{P_{2+2M}^f}{p}$
0,01	0,0199	1,99	0,5700	57,0	0,7076	70,75
0,1	0,19	1,9	0,6360	6,36	0,7536	7,536
0,3	0,51	1,7	0,7700	2,5667	0,8454	2,8180
0,5	0,75	1,5	0,8789	1,7578	0,9190	1,838
0,7	0,91	1,3	0,9555	1,365	0,9703	1,4001
0,9	0,99	1,1	0,9950	1,1056	0,9967	1,1074
0,99	0,9999	1,01	0,99995	1,0101	0,999967	1,0101

В общем случае при числе перемычек, равном  $n$ , функциональная надёжность двух параллельных трубопроводов определяется выражением

$$P_{2+nM}^f = \left[ 1 - \left( \frac{1-p}{n+1} \right)^2 \right]^{n+1}. \quad (4.8)$$

Из последнего выражения следует, что при числе перемычек  $n \rightarrow \infty$  функциональная надёжности системы двух параллельных трубопроводов  $P_{2+nM}^f \rightarrow 1$ , т.е. система становится безотказной.

При составлении табл.4.2 и 4.3 техническая надёжность перемычек принималась равной единице. Последние выводы относительно ввода одной или двух перемычек в магистральные сети

сделаны без учёта технической надёжности перемычек. Поэтому расчётные значения функциональных надёжностей  $P_{2+1м}^f$  и  $P_{2+2м}^f$  в табл.4.2 и 4.3 следует рассматривать как их верхние оценки.

#### **4.2. Функциональная надёжность магистральных трубопроводных транспортных систем с учётом надёжности перемычек и мест их расположения**

Для гарантированного транспорта ЦП с помощью магистральной трубопроводной системы ее функциональная надёжность должна быть не ниже некоторой допустимой. Если техническая надёжность системы не позволяет обеспечить должную функциональную надёжность, необходимо прибегнуть к мероприятиям по её повышению, что, в свою очередь, требует соответствующих материальных, трудовых и временных затрат. Чем меньше затрат, тем меньше их стоимость и тем эффективнее достижение заданной функциональной надёжности. Чем выше функциональная надёжность системы, тем лучше она отвечает своему функциональному назначению.

В связи с противоречивостью двух критериев (функциональная надёжность и стоимостные расходы на её достижения) точный расчет надёжности является очень важной задачей, поскольку позволяет оптимизировать затраты на достижение заданной надёжности.

Из существующих способов повышения функциональной надёжности наиболее эффективным является устройство перемычек между двумя параллельными трубопроводами. Данный способ наилучшим образом удовлетворяет противоречивые требования надёжности и экономики, т.е. обеспечивает разумный компромисс между ними. Поскольку устройство перемычек приводит к мостовым соединениям, то возникает необходимость в разработке точных математических моделей для определения функциональной надёжности таких соединений.

Решение проблемы точного расчёта функциональной надёжности открывает путь к решению многих прикладных задач по эксплуатации и проектированию транспортных систем, в частно-

сти, к такой важной задаче, как сравнение по безотказности в работе двух структурных вариантов системы.

Верхняя оценка функциональной надёжности  $P_{2+1M}^f$  по формуле (4,5), (4,7), (4.8) была получена при двух допущениях:

- техническая надёжность перемычки  $p_m = 1$ ;
- два параллельных трубопровода разбиваются перемычкой на *равные* участки с равной технической надёжностью  $\left(\frac{1+p}{2}\right)$ ,

где  $p$  определяет техническую надёжность каждого из двух параллельных трубопроводов до их разбиения перемычкой.

Чтобы получить точное значение функциональной надёжности необходимо:

- во-первых, сформировать математическую модель функциональной надёжности с учётом технической надёжности моста  $p_m$  меньше единицы;
- во-вторых, доказать, что только разбиение трубопроводов на равные участки приводит к максимальному повышению функциональной надёжности.

#### **4.2.1. Функциональная надёжность двух параллельных трубопроводов с учётом надёжности перемычки**

Вернемся к устройству перемычки между двумя параллельными трубопроводами (рис.4.3). Устройство перемычки предполагает использование пяти задвижек, управляющих потоками ЦП в системе. Кроме этих пяти задвижек, система ещё имеет четыре задвижки – по одной на каждом из четырёх трубопроводных участков. Надёжность всех девяти упомянутых задвижек при получении формулы (4.3) для определения функциональной надёжности были приняты равными единице. Такое допущение небезосновательно, поскольку задвижки намного надёжнее трубопроводных участков. Однако для точного расчёта надёжности магистральных трубопроводных систем игнорирование надёжностью задвижек

недопустимо. Каждая дополнительная перемычка добавляет в систему пять задвижек.

Рассчитаем надёжность трубопроводной магистральной системы, состоящей из двух параллельных трубопроводов с одной перемычкой, с помощью метода, изложенного в предыдущем разделе. Исходный граф системы на рис.4.3 соответствует графу, изображенному на рис.4.5.

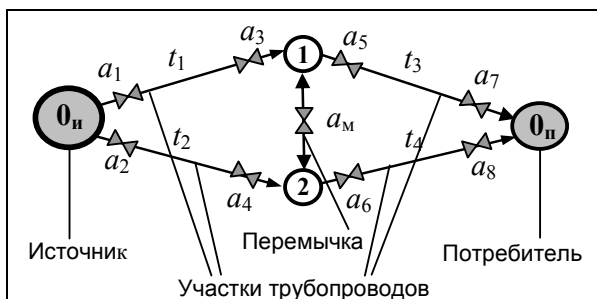


Рис.4.5 – Исходный граф магистральной системы из двух параллельных трубопроводов с одной перемычкой

На графе задвижки  $a_3 - a_6$  принадлежат перемычке, задвижки  $a_1 - a_2$  разделяют источник и систему, задвижки  $a_7 - a_8$  разделяют систему и потребителя, задвижка  $a_M$  – соединяет два параллельных трубопровода (мост). Все задвижки являются существенными. Участки  $t_1$  и  $t_3$  принадлежат одному трубопроводу, участки  $t_2$  и  $t_4$  – другому.

Состав аварийно-ремонтных зон отражен в табл.4.4. Перемычка представлена двумя зонами: 5-й и 6-й. Поскольку трубы перемычки имеют несоизмеримо малую длину по сравнению длинами трубопроводов, то зоны 5 и 6 не имеют трубопроводов, и, следовательно, техническая надёжность этих АРЗ равна единице.

Несмотря на то, что 5-я и 6-я зоны работают безотказно, исключать их из графа АРЗ нельзя, поскольку они являются элементами структуры сети и влияют на функциональную надёжность системы.

Таблица 4.4

№ АРЗ	Конструктивные элементы АРЗ		
	Трубопроводы	Отсекающие задвижки	Колодцы
1	$t_1$	$a_1, a_3$	—
2	$t_2$	$a_2, a_4$	—
3	$t_3$	$a_5, a_7$	—
4	$t_4$	$a_6, a_8$	—
5	—	$a_3, a_5, a_M$	1
6	—	$a_4, a_6, a_M$	2

На рис.4.6 показан граф аварийно-ремонтных зон для магистральной системы, состоящей из двух параллельных трубопроводов с одной перемычкой.

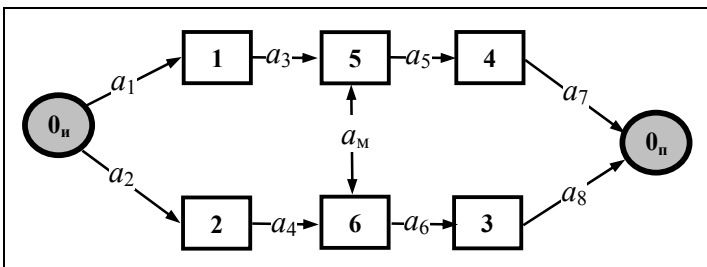


Рис.4.6 – Граф аварийно-ремонтных зон

Построение расчетной модели для функциональной надёжности системы относительно зоны  $0_n$  (единственного потребителя)

имеет свои особенности. Если задвижка  $a_M$  выходит из строя, то для её ремонта необходимо прекратить доступ ЦП в зоны 5 и 6. Но если эти зоны отсекаются от магистральной сети, то подача ЦП потребителю также прекращается. Поэтому задвижка  $a_M$  и остальная часть графа АРЗ представляют собой последовательную модель расчёта функциональной надёжности, что и показано на рис. 4.7. Аналогичная ситуация складывается с задвижками  $a_1$  и  $a_2$ : для их ремонта необходимо отключить источник от сети.

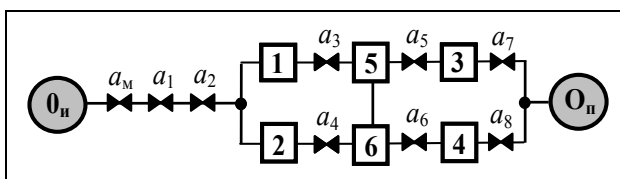


Рис.4.7 – Расчётная модель функциональной надёжности сети

Поскольку техническая надёжность 5-й и 6-й зон равна единице, то расчётная модель системы может быть упрощена за счёт исключения этих зон из модели (рис.4.8).

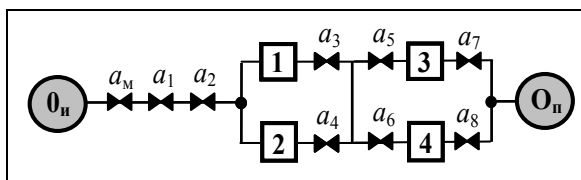


Рис.4.8 – Упрощенная расчётная модель функциональной надёжности сети

Согласно упрощенной расчётной схеме, функциональная надёжность трубопроводной сети из двух параллельных трубопроводов, разделённых одной перемычкой, определится выражением



$$P_{2+1\text{б}}^f = p_{a_m} p_{a_1} p_{a_2} \left[ 1 - (1 - P_{Z_1} p_{a_3}) (1 - P_{Z_2} p_{a_4}) \right] \cdot \left[ 1 - (1 - p_{a_5} P_{Z_3} p_{a_7}) (1 - p_{a_6} P_{Z_4} p_{a_8}) \right]. \quad (4.9)$$

Выражение (4.9) является математической моделью функциональной надёжности для системы из двух параллельных трубопроводов с одним мостовым соединением элементов при неравновесных плечах моста и одной перемычкой с технической надёжностью, равной единице.

В случае мостового соединения с равновесными плечами  $P_{Z_1} = P_{Z_2} = P_{Z_3} = P_{Z_4} = \frac{1+p}{2}$ ,  $p$  – техническая надёжность одного из двух параллельных трубопроводов до установки перемычки, и запорной арматуры с одинаковой технической надёжностью  $p_{a_i} = p_m = p_a$  ( $i = 1, 9$ ) выражение (4.3) принимает вид

$$P_{2+1\text{м}}^f = p_a^3 \left[ 1 - \left( 1 - p_a \cdot \frac{1+p}{2} \right)^2 \right] \left[ 1 - \left( 1 - p_a^2 \cdot \frac{1+p}{2} \right)^2 \right]. \quad (4.10)$$

При установке двух перемычек с равными техническими надёжностями расчётная модель соответствует модели, показанной на рис.4.9.

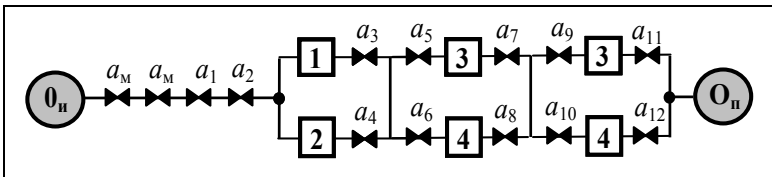


Рис.4.9 – Упрощенная расчётная модель функциональной надёжности сети с двумя перемычками

Для магистральной системы трубопроводов с двумя перемычками выражение (4.10) принимает вид

$$P_{2+2м}^f = p_a^4 \left[ 1 - \left( 1 - p_a \cdot \frac{2+p}{3} \right)^2 \right] \left[ 1 - \left( 1 - p_a^2 \cdot \frac{2+p}{3} \right)^2 \right]^2. \quad (4.11)$$

Обобщение (4.10) на случай  $n$  перемычек с одинаковыми техническими характеристиками приводит к выражению

$$P_{2+нм}^f = p_a^{n+2} \left[ 1 - \left( 1 - p_a \cdot \frac{n+p}{n+1} \right)^2 \right] \left[ 1 - \left( 1 - p_a^2 \cdot \frac{n+p}{n+1} \right)^2 \right]^n. \quad (4.12)$$

Последнее выражение представляет собой математическую модель функциональной надёжности магистральной системы трубопроводов для произвольного числа перемычек и может выступать в качестве критерия функциональной надёжности при решении различных экстремальных задач, связанных с симметричной установкой перемычек.

#### 4.2.2. Оптимальное расположение перемычек в магистральных трубопроводах

Математические модели (4.10) – (4.12) функциональной надёжности получены при равновесных плечах мостового соединения, образованного за счёт ввода перемычки между двумя параллельными трубопроводами. Правомерность симметричного расположения перемычки для получения максимальной выгоды от её установки необходимо доказать.

Пусть система двух параллельных трубопроводов будет асимметрична по отношению к перемычке (рис.4.10). При этом длина трубопровода от источника ЦП до потребителя составляет  $L$  км, а до перемычки –  $l$  км.

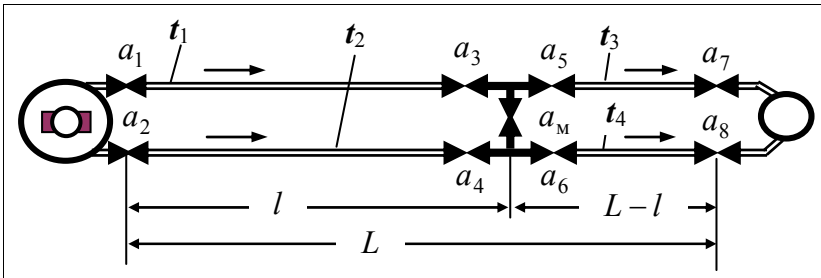


Рис.4.10 – Асимметричная установка перемычки

При асимметричной установке перемычки техническая надёжность каждого участка трубопровода  $t_1$  и  $t_2$  составит  $\left(1 - \frac{(1-p)l}{L}\right)$ , а каждого участка  $t_3$  и  $t_4$  –  $\left(1 - \frac{(1-p)(L-l)}{L}\right)$ . Тогда, если принять техническую надёжность для всех перемычек  $p_{a_i} = p_M = 1$  ( $i = \overline{1,8}$ ), то функциональная надёжность системы, согласно формуле (4.9), будет соответствовать выражению

$$P_{2+1M}^f = \left[ 1 - \left( 1 - \left( 1 - \frac{(1-p)l}{L} \right) \right)^2 \right] \times \left[ 1 - \left( 1 - \left( 1 - \frac{(1-p)(L-l)}{L} \right) \right)^2 \right]. \quad (4.13)$$

Введём в (4.13) замены  $x = \frac{l}{L}$ ,  $(1-x) = \frac{L-l}{L}$  и упростим полученное выражение:

$$P_{2+1M}^f = \left[ 1 - (1 - (1 - (1-p)x))^2 \right] \cdot \left[ 1 - (1 - (1 - (1-p)(1-x)))^2 \right] =$$

$$\begin{aligned}
 &= \left[ 1 - (1-p)^2 x^2 \right] \cdot \left[ 1 - (1-p)^2 (1-x)^2 \right] = \\
 &= (1-p)^4 \left[ \frac{1}{(1-p)^2} - x^2 \right] \cdot \left[ \frac{1}{(1-p)^2} - (1-x)^2 \right]. \quad (4.14)
 \end{aligned}$$

В полученном выражении (4.14) неизвестная величина  $x$  может находиться только в пределах от 0 до 1, поскольку длина  $l$  может принимать значения от 0 до  $L$ . Для определения оптимального расположения перемычки достаточно найти значение  $x^*$ , которое доставляет максимум функции (4.14).

Таким образом, определение оптимального расположения перемычки сводится к задаче одномерной условной минимизации целевой функции (4.14) при двусторонней ограниченности переменной  $x$

$$P_{2+1M}^f = (1-p)^4 \left[ \frac{1}{(1-p)^2} - x^2 \right] \cdot \left[ \frac{1}{(1-p)^2} - (1-x)^2 \right] \rightarrow \max_{0 \leq x \leq 1}. \quad (4.15)$$

Для унимодальных целевых функций решение задач такого класса можно получить с помощью распространённых прямых методов одномерной минимизации, таких как метод дихотомии, метод Фибоначчи, метод золотого сечения. При этом в качестве начального интервала неопределённости следует взять  $\Delta x = [0; 1]$ . Но поскольку для использования перечисленных методов необходимо предварительно доказать унимодальный характер целевой функции в задаче (4.15), то лучше воспользоваться классическими методами математического анализа для исследования нелинейных одномерных функций.

Определим стационарные точки целевой функции в (4.15), для чего найдём производную функции и приравняем её нулю:

$$\begin{aligned} \frac{dP_{2+1M}^f}{dx} = (1-p)^4 \left\{ 2(1-x) \left[ \frac{1}{(1-p)^2} - x^2 \right] - \right. \\ \left. - 2 \left[ \frac{1}{(1-p)^2} - (1-x)^2 \right] \right\} = 0. \end{aligned} \quad (4.16)$$

Решение уравнения (4.16) даёт три корня: один действительный  $x_1 = \frac{1}{2}$  и два мнимых  $x_{2,3} = \frac{1}{2} \pm \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1}{(1-p)^2}}$ . Следовательно, функция  $P_{2+1M}^f$  имеет только одну стационарную точку, которая попадает в диапазон допустимых решений (от 0 до 1).

Вычислим в стационарной точке  $x_1 = \frac{1}{2}$  вторую производную целевой функции

$$\left. \frac{d^2 P_{2+1M}^f}{dx^2} \right|_{x=\frac{1}{2}} = 1 - \frac{2}{(1-p)^2} - 6(1-x)x = - \left( \frac{2}{(1-p)^2} + \frac{1}{2} \right). \quad (4.17)$$

Поскольку целевая функция в точке  $x_1 = \frac{1}{2}$  отрицательна, то функция в данной точке имеет явный максимум. Следовательно, оптимальным решением задачи (4.15) является  $x^* = \frac{1}{2}$ .

Решение экстремальной задачи (4.15) означает, что перемычка, разделяющая каждый из двух параллельных трубопровода на два строго равных между собой участка, обеспечивает наибольшее увеличение функциональной надёжности всей магистральной системы.

В случае, когда между двумя параллельными трубопроводами устанавливается  $n$  перемычек с безотказными задвижками, то для наибольшего увеличения функциональной надёжности системы каждый трубопровод должен быть разделен перемычками на  $(n + 1)$  равную часть. Данное утверждение вытекает из решения задачи математического программирования при линейных ограничениях:

$$P_{2+nM}^f = p_a^{n+2} \cdot \left[ 1 - \left( 1 - p_a [1 - (1 - p)x_1] \right)^2 \right] \cdot \prod_{i=2}^{n+1} \left[ 1 - \left( 1 - p_a^2 [1 - (1 - p)x_i] \right)^2 \right] \rightarrow \max_{x_i \in \Omega \subset E^{n+1}}, \quad (4.18)$$

$$\Omega: f(x_1, x_2, \dots, x_{n+1}) = \sum_{i=1}^{n+1} x_i - 1 = 0; \quad (4.19)$$

$$0 \leq x_i \leq 1, \quad i = \overline{1, n+1}. \quad (4.20)$$

Здесь  $x_i = \frac{l_i}{L}$ , где  $l_i$  – длина  $i$ -й части каждого трубопровода,

$L = \sum_{i=1}^{n+1} l_i$  – длина каждого из двух параллельных трубопроводов;

$p_a$  – техническая надёжность каждой задвижки.

Задача математического программирования в общем случае решается только прямыми методами оптимизации. Чтобы избежать использования прямых методов, на начальном этапе решения проигнорируем ограничение (4.20). В этом случае задача (4.18) – (4.20) превратится в задачу оптимизации (4.18) – (4.19) при ограничении в виде равенства, которая теперь может быть решена классическим методом, например, методом неопределённых множителей Лагранжа.

Построим функцию Лагранжа в условиях задачи (4.18) – (4.19):

$$\begin{aligned}
 L(x_1, x_2, \dots, x_{n+1}, \lambda) &= P_{2+nM}^f - \lambda [f(x_1, x_2, \dots, x_{n+1})] = \\
 &= p_a^{n+2} \cdot \left[ 1 - (1 - p_a [1 - (1 - p)x_1])^2 \right] \times \\
 &\times \prod_{i=2}^{n+1} \left[ 1 - (1 - p_a^2 [1 - (1 - p)x_i])^2 \right] - \lambda \left( \sum_{k=1}^{n+1} x_k - 1 \right), \quad (4.21)
 \end{aligned}$$

где  $\lambda$  – неопределённый множитель Лагранжа.

Для поиска стационарных точек функции Лагранжа необходимо решить систему из  $(n + 2)$  уравнений

$$\left\{ \begin{aligned}
 \frac{\partial L}{\partial x_1} &= -2p_a^{n+3}(1-p)(1-p_a[1-(1-p)x_1]) \times \\
 &\times \left\{ \prod_{i=2}^{n+1} \left[ 1 - (1 - p_a^2 [1 - (1 - p)x_i])^2 \right] \right\} - \lambda = 0; \\
 \frac{\partial L}{\partial x_k} \Big|_{k=2, n+1} &= -2p_a^{n+4}(1-p)(1-p_a^2[1-(1-p)x_k]) \times \\
 &\times \left[ 1 - (1 - p_a[1-(1-p)x_1])^2 \right] \times \\
 &\times \left\{ \prod_{\substack{i=2 \\ i \neq k}}^{n+1} \left[ 1 - (1 - p_a^2 [1 - (1 - p)x_k])^2 \right] \right\} - \lambda = 0; \\
 \frac{\partial L}{\partial \lambda} &= \sum_{k=1}^{n+1} x_k - 1 = 0.
 \end{aligned} \right.$$

Все уравнения системы, кроме последнего, содержат операторы произведения  $\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{n+1}(\cdot)$ , которые отличаются друг от друга только параметрами индекса. Чтобы выровнять параметры всех операторов  $\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{n+1}(\cdot)$ , каждое  $k$ -е уравнение умножим и разделим на величину  $\left[1 - \left(1 - p_a^2[1 - (1 - p)x_k]\right)^2\right]$ ,  $k = \overline{2, (n+1)}$ . Кроме того, первое уравнение умножим и разделим на величину  $p_a \left[1 - \left(1 - p_a[1 - (1 - p)x_1]\right)^2\right]$ . После несложных дополнительных алгебраических преобразований получим новую систему уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{2p_a^{n+4}(1-p)(1-p_a[1-(1-p)x_1]) \cdot \left[1 - \left(1 - p_a[1 - (1-p)x_1]\right)^2\right]}{p_a \left[1 - \left(1 - p_a[1 - (1-p)x_1]\right)^2\right]} \times \\ \quad \times \prod_{i=2}^{n+1} \left[1 - \left(1 - p_a^2[1 - (1-p)x_i]\right)^2\right] = -\lambda; \\ \frac{2p_a^{n+4}(1-p)(1-p_a^2[1-(1-p)x_k]) \cdot \left[1 - \left(1 - p_a[1 - (1-p)x_1]\right)^2\right]}{1 - \left(1 - p_a^2[1 - (1-p)x_k]\right)^2} \times \\ \quad \times \prod_{i=2}^{n+1} \left[1 - \left(1 - p_a^2[1 - (1-p)x_i]\right)^2\right] = -\lambda, \quad k = \overline{1, n+1}; \\ \sum_{k=1}^{n+1} x_k - 1 = 0, \end{array} \right.$$



где  $1 - (1 - p_a[1 - (1 - p)x_k])^2 \neq 0$ ,  $1 - (1 - p_a^2[1 - (1 - p)x_k])^2 \neq 0$ ,  
или  $x_k \neq \frac{1}{1 - p}$ ,  $k = \overline{1, n+1}$ .

Выделим в правые части первых  $(n+1)$  уравнений равные величины

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{p_a(1 - p_a[1 - (1 - p)x_1])}{1 - (1 - p_a[1 - (1 - p)x_1])^2} = \\ & = \frac{-\lambda}{2p_a^{n+4}(1 - p) \left[ 1 - (1 - p_a[1 - (1 - p)x_1])^2 \right] \prod_{i=2}^{n+1} \left[ 1 - (1 - p_a^2[1 - (1 - p)x_i])^2 \right]}; \\ & \frac{2p_a^{n+4}(1 - p)(1 - p_a^2[1 - (1 - p)x_k])}{1 - (1 - p_a^2[1 - (1 - p)x_k])^2} \Big|_{k=\overline{2, n+1}} = \\ & = \frac{-\lambda}{2p_a^{n+4}(1 - p) \left[ 1 - (1 - p_a[1 - (1 - p)x_1])^2 \right] \prod_{i=2}^{n+1} \left[ 1 - (1 - p_a^2[1 - (1 - p)x_i])^2 \right]}; \\ & \sum_{k=1}^{n+1} x_k - 1 = 0. \end{aligned} \right.$$

Поскольку в первых  $(n+1)$  уравнениях все правые части равны, то равны и их левые части:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1 - p_a [1 - (1 - p)x_1]}{p_a [1 - (1 - p_a [1 - (1 - p)x_k])^2]} = \frac{1 - p_a^2 [1 - (1 - p)x_2]}{1 - (1 - p_a^2 [1 - (1 - p)x_2])^2}; \\ \frac{1 - p_a^2 [1 - (1 - p)x_k]}{1 - (1 - p_a^2 [1 - (1 - p)x_k])^2} = \frac{1 - p_a^2 [1 - (1 - p)x_{k+1}]}{1 - (1 - p_a^2 [1 - (1 - p)x_{k+1}])^2}, \quad k = \overline{1, n}; \\ \sum_{k=1}^{n+1} x_k - 1 = 0, \end{array} \right.$$

или

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 \begin{cases} = x_k & \text{при } p_a = 1, \\ < x_k & \text{при } p_a < 1, \end{cases} \quad k = \overline{2, n+1}; \\ x_k = x_{k+1}, \quad k = \overline{2, n}; \\ \sum_{k=1}^{n+1} x_k - 1 = 0. \end{array} \right.$$

Из полученной системы следует, что при  $p_a = 1$  (задвижки безотказны)

$$x_1 = x_2 = \dots = x_{n+1} = \frac{1}{n+1}. \quad (4.22)$$

Поскольку все координаты стационарной точки удовлетворяют ограничению (4.20), то она является стационарной точкой как для задачи (4.18) – (4.19), так и (4.18) – (4.20).

Для определения характера стационарной точки исследуем матрицу Гесса целевой функции в задаче (4.18), вычисленную в этой точке.

Определим сначала все вторые и смешанные частные производные целевой функции при условии  $p_a = 1$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 P_{2+nM}}{\partial x_k^2} = -2(1-p)^4 \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq k, j}}^{n+1} [1 - (1 - [1 - (1-p)x_i])^2], \quad k = \overline{1, n+1}; \\ \frac{\partial^2 P_{2+nM}}{\partial x_k \partial x_j} = 4(1-p)^2 (1 - [1 - (1-p)x_k]) (1 - [1 - (1-p)x_j]) \times \\ \times \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq k, j}}^{n+1} [1 - (1 - [1 - (1-p)x_i])^2], \quad k, j = \overline{1, n+1}. \end{array} \right.$$

Вычислим все вторые и смешанные частные производные целевой функции в стационарной точке с координатами

$$x_1 = x_2 = \dots = x_{n+1} = \frac{1}{n+1}:$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 P_{2+nM}}{\partial x_k^2} = -2(1-p)^2 \left( 1 - \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1-p}{n+1} \right) \right]^2 \right)^n, \quad k = \overline{1, n+1}; \\ \frac{\partial^2 P_{2+nM}}{\partial x_k \partial x_j} = 4(1-p)^2 \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1-p}{n+1} \right) \right]^2 \times \\ \times \left( 1 - \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1-p}{n+1} \right) \right]^2 \right)^{n-1}, \quad k, j = \overline{1, n+1}. \end{array} \right.$$

Сравним по модулю значения вторых частных и смешанных производных

$$\frac{\left| \frac{\partial^2 P_{2+nM}}{\partial x_k^2} \right|}{\frac{\partial^2 P_{2+nM}}{\partial x_k \partial x_j}} = \frac{1 - \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1-p}{n+1} \right) \right]^2}{2 \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1-p}{n+1} \right) \right]^2} = \frac{n^2 + n + 2p - p^2}{2(1-p)^2}. \quad (4.23)$$

Числитель в (4.23)  $(n^2 + n + 2p - p^2) > 2$ , а знаменатель  $2(1-p)^2 < 2$ . Все вторые частные производные функции (4.18) при условии  $p_a = 1$ , взятые по модулю, превышают смешанные производные. В таком случае характер матрицы Гесса для функции (4.18) совпадает с характером матрицы

$$\mathbf{H}_{\text{отн}} = \begin{bmatrix} -\frac{n^2+n}{2} & 1 & \dots & 1 \\ 1 & -\frac{n^2+n}{2} & \dots & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 1 & \dots & -\frac{n^2+n}{2} \end{bmatrix}$$

размерности  $(n+1) \times (n+1)$ , где  $n > 1$ .

Анализ матрицы  $\mathbf{H}_{\text{отн}}$  показывает, что все её нечётные главные определители меньше нуля, а все чётные – больше. Следовательно, исследуемая стационарная точка является точкой максимума при условии.

Решение задачи (4.18) – (4.20)  $x_1^* = x_2^* = \dots x_{n+1}^* = \frac{1}{n+1}$  с

учётом условия (4.23) свидетельствует о справедливости утверждения, что наибольшее увеличение функциональной надёжно-

сти системы достигается при симметричной установке перемычек, т.е. в случае, когда  $n$  перемычек делят каждый из двух параллельных трубопроводов на  $(n + 1)$  равную часть. Однако при чрезмерном увеличении числа перемычек  $n$  при неизменных значениях  $p_a$  и  $p$  добавление новых перемычек может привести к обратному эффекту. Каждая дополнительная перемычка требует установки пяти задвижек, которые хотя и незначительно, но отрицательно влияют на функциональную надёжность системы. При этом положительное влияние каждой новой перемычки на функциональную надёжность постепенно снижается. Поэтому при увеличении числа перемычек  $n$  обязательно наступит такой момент, когда функциональная надёжность будет не увеличиваться, а уменьшаться!

#### **4.3. Метод расчёта функциональной надёжности в анализе конструкций магистральных трубопроводов**

Изложенный в разделе 3 метод расчёта функциональной надёжности трубопроводных транспортных систем позволяет проводить анализ на надёжность трубопроводных сетевых структур и конструкций перемычек в магистральных трубопроводах.

В качестве примера проведём сравнительный анализ протяжённой магистральной сети с использованием перемычек трёх типов:

- с четырьмя задвижками (рис. 4.11, а);
- с пятью задвижками (рис. 4.11, б);
- с шестью задвижками (рис. 4.11, в).

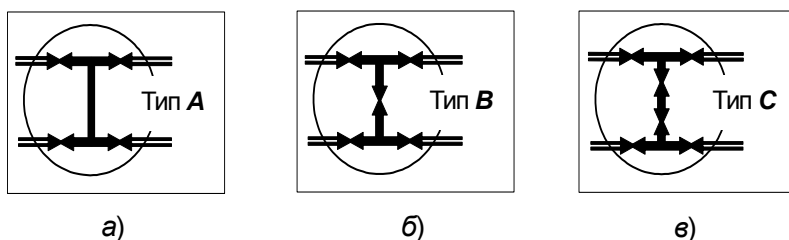


Рис. 4.11 – Типы перемычек

### 4.3.1. Расчёт функциональной надёжности магистральной сети с перемычками А-типа

Пусть конструкция магистральной трубопроводной системы предполагает использование перемычек А-типа. Тогда структуре магистральной системе с произвольным числом перемычек будет соответствовать схема, изображенная на рис. 4.12.

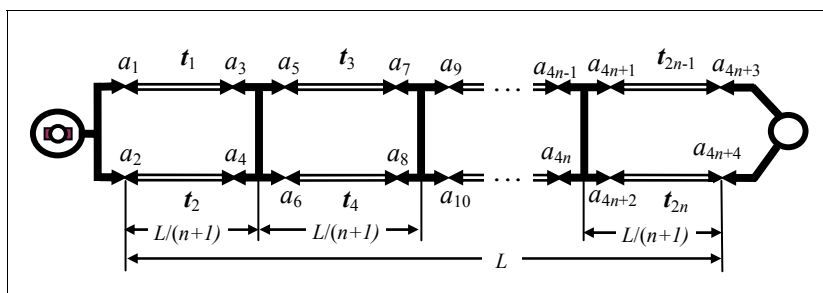


Рис. 4.12 – Схема магистральной трубопроводной системы с произвольным числом перемычек А-типа

Конструкция имеет следующие особенности:

- два идентичных параллельных трубопровода характеризуются одинаковыми техническими и эксплуатационными показателями, а именно: длиной каждого трубопровода  $L$ , материалом

изготовления, толщиной стенок, временными периодами и условиями эксплуатации;

- параллельные трубопроводы соединены  $n$  перемычками А-типа, которые делят магистральную сеть на равные по длине участки в количестве  $n + 1$ ;

- все задвижки характеризуются также одинаковыми техническими и эксплуатационными параметрами;

- каждый участок трубопровода  $t_i$ ,  $i \in \{1, \overline{(2n + 2)}\}$ , обладает технической надёжностью  $p_y$ ;

- каждая задвижка сети  $a_j$ ,  $j \in \{1, \overline{(4n + 4)}\}$  обладает технической надёжностью  $p_a$ .

Рассчитаем по известным техническим надёжностям отдельных элементов сети функциональную надёжность всей сети методом, изложенным в разделе 3.

Граф аварийно-ремонтных зон для рассматриваемой магистральной трубопроводной системы с произвольным числом перемычек А-типа изображён на рис. 4.13. Вершина графа  $0_i$  соответствует источнику ЦП; вершина  $0_n$  – потребителю ЦП; вершины  $Z_1, Z_2, \dots, Z_{2n}$  – протяжённым трубопроводам  $t_1, t_2, \dots, t_{2n}$ ; вершины  $z_1, z_2, \dots, z_n$  – трубопроводным участкам, принадлежащим перемычкам; вершины  $z_{01}, z_{02}, z_{03}$  – трубопроводным участкам, соединяющим источник или потребителя с трубопроводной сетью; ветви графа – запорной арматуре с одноимённым обозначением.

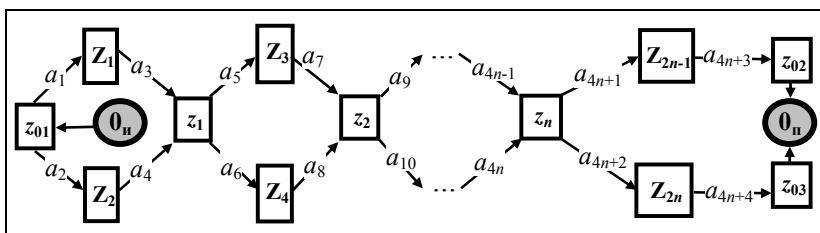


Рис.4.13 – Граф аварийно-ремонтных зон магистральной трубопроводной системы с произвольным числом перемычек А-типа

Длина трубопроводных участков в зонах  $z_1, z_2, \dots, z_n$  и  $z_{01}, z_{02}, z_{03}$  намного меньше длины каждого из участков  $t_1, t_2, \dots, t_{2n}$ , находящихся в зонах  $Z_1, Z_2, \dots, Z_{2n}$ . Поэтому можно допустить, что вероятности безотказной работы каждой из зон  $z_1, z_2, \dots, z_n$  и  $z_{01}, z_{02}, z_{03}$  равна единице. В этом случае данные зоны не оказывают никакого влияния на функциональную надёжность трубопроводной сети. По этой причине на рис. 4.14 в расчётной модели вероятности поставки ЦП потребителю технические надёжности, соответствующие участкам  $z_1, z_2, \dots, z_n$  и  $z_{01}, z_{02}, z_{03}$ , отсутствуют.

Расчётная модель функциональной надёжности трубопроводной сети (рис. 4.14) представляет собой смешанную (последовательно-параллельную) модель надёжности. Каждый конструктивный элемент сети в модели представлен блоком с указанием технической надёжности (внутри блока) и обозначения этого элемента (над блоком).



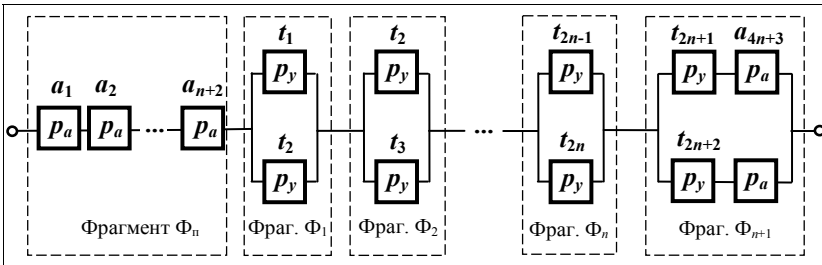


Рис. 4.14 – Расчётная модель функциональной надёжности трубопроводной системы с произвольным числом перемычек А-типа

Построение расчётной модели основывается на структуре графа аварийно-ремонтных зон (рис. 4.13) и анализе влияния выхода из строя различных конструктивных элементов сети на поставку целевого продукта потребителю. Так, выход из строя любой из задвижек  $a_1, a_2, \dots, a_{4n+2}$  приводит к прекращению подачи ЦП потребителю на время устранения неисправности в запорной арматуре. Только при условии одновременной безотказной работы этих задвижек потребитель имеет возможность получать ЦП. Поэтому задвижкам  $a_1, a_2, \dots, a_{4n+2}$  в расчётной модели соответствует последовательная модель надёжности (фрагмент модели  $\Phi_n$ ), а эквивалентная вероятность транспорта ЦП через эти задвижки составит

$$P_{\Phi_n}^{fA} = p_a^{4n+2}. \quad (4.24)$$

Здесь верхний индекс  $fA$  обозначает функциональную надёжность фрагмента сети с перемычками А-типа.

Вся расчётная схема сети представляет собой последовательную модель надёжности, состоящую из фрагмента  $\Phi_n$  и фрагментов  $\Phi_k$ ,  $k \in \{1, (n+1)\}$ , каждому из которых соответствует часть сети, состоящая из двух параллельных участков  $t_{2k-1}$  и

$t_{2k}$ ,  $k \in \{1, \overline{(n+1)}\}$ . Выход из строя части сети, соответствующей фрагменту  $\Phi_k$  или фрагменту  $\Phi_n$ , приводит к прекращению подачи ЦП потребителю. Поэтому все фрагменты образуют последовательную модель надёжности, т.е. искомая функциональная надёжность сети определяется выражением

$$P^{fA} = P_{\Phi_n}^{fA} \prod_{k=1}^{n+1} P_{\Phi_k}^{fA}, \quad (4.25)$$

где  $P_{\Phi_k}^{fA}$  – функциональная надёжность  $k$ -й части сети, состоящей из параллельных участков  $t_{2k-1}$  и  $t_{2k}$ .

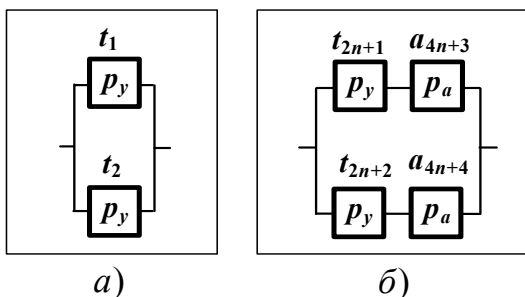


Рис. 4.15. Фрагменты модели надёжности магистральной трубопроводной сети с перемычками А-типа

Фрагмент  $\Phi_{n+1}$  расчётной схемы представляет собой параллельную модель двух последовательных цепочек (рис. 4.15,б). Одна цепочка определяет надёжность участка сети с трубопроводом  $t_{2n+1}$  и задвижкой  $a_{4n+3}$ , а другая – надёжность сети с трубопроводом  $t_{2n+2}$  и задвижкой  $a_{4n+4}$ . ЦП будет поступать потребителю, если хотя бы одна из цепочек находится в исправном состоянии. Поэтому цепочки образуют параллельную модель

надёжности, согласно которой надёжность фрагмента  $\Phi_{n+1}$  определяется выражением

$$P_{\Phi_0}^{fA} = 1 - (1 - p_y p_a)^2. \quad (4.26)$$

Для остальных фрагментов  $\Phi_k$  (рис. 4.15,а);,  $k \in \{\overline{1, n}\}$ , надёжность определяется аналогичным образом за исключением того, что теперь в каждой параллельной цепочке присутствует только один элемент, определяющий техническую надёжность трубопроводного участка:

$$P_{\Phi_k}^{fA} = 1 - (1 - p_y)^2. \quad (4.27)$$

Подставляя (4.24), (4.26) – (4.27) в (4.25), получим математическую модель функциональной надёжности всей магистральной сети в зависимости от технической надёжности отдельных её конструктивных элементов при произвольном количестве ( $n$ ) перемычек А-типа

$$P^{fA} = p_a^{4n+2} \left[ 1 - (1 - p_y)^2 \right]^n \left[ 1 - (1 - p_y p_a)^2 \right]. \quad (4.28)$$

#### 4.3.2. Расчёт функциональной надёжности магистральной сети с перемычками В-типа

Пусть теперь конструкция магистральной трубопроводной системы предполагает использование перемычек В-типа. Тогда структуре магистральной системе с произвольным числом перемычек будет соответствовать схема, изображенная на рис. 4.16.

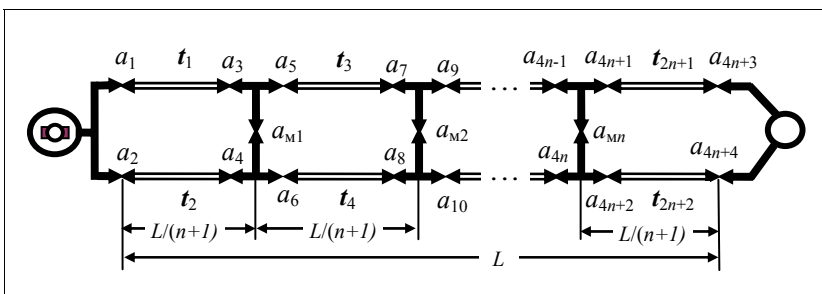


Рис. 4.16 – Схема магистральной трубопроводной системы с произвольным числом перемычек B-типа

Пусть также сети присущи те же особенности, что и сети в предыдущем подразделе. Добавим только, что центральные задвижки всех перемычек  $a_{mk}$ ,  $k \in \{1, n\}$  обладают такой же технической надёжностью  $p_a$  как и остальные задвижки  $a_j$ ,  $j \in \{1, 4n+4\}$ . Тогда граф аварийно-ремонтных зон для рассматриваемой магистральной трубопроводной системы с произвольным числом перемычек B-типа будет иметь вид, показанный на рис. 4.17. Как и в предыдущем графе (рис. 4.13), вершина  $0_n$  соответствует источнику ЦП; вершина  $0_n$  – потребителю ЦП; вершины  $Z_1, Z_2, \dots, Z_{2n}$  – протяжённым трубопроводам  $t_1, t_2, \dots, t_{2n}$ ; вершины  $z_{01}, z_{02}, z_{03}$  – трубопроводным участкам, соединяющим источник или потребителя с трубопроводной сетью; ветви графа – запорной арматуре с одноимённым обозначением.

Вновь введенные зоны  $z_1, z_3, \dots, z_{2n-1}$  соответствуют трубопроводным участкам, принадлежащим перемычкам и первому из двух параллельных трубопроводов;  $z_2, z_4, \dots, z_{2n}$  – трубопроводным участкам, принадлежащим перемычкам и второму из двух параллельных трубопроводов.

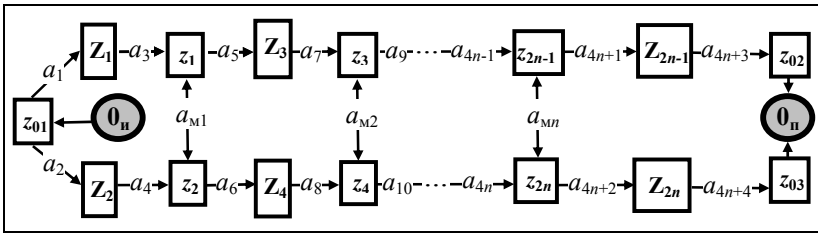


Рис.4.17 – Граф аварийно-ремонтных зон магистральной трубопроводной системы с произвольным числом перемычек типа  $B$

Длина трубопроводных участков в зонах  $z_1, z_2, \dots, z_{2n}$ , как в зонах  $z_{01}, z_{02}, z_{03}$ , намного меньше длины каждого из участков  $t_1, t_2, \dots, t_{2n}$ , находящихся в зонах  $Z_1, Z_2, \dots, Z_{2n}$ . Поэтому принимаем вероятность безотказной работы каждой из зон  $z_1, z_2, \dots, z_{2n}$  и  $z_{01}, z_{02}, z_{03}$  равной единице и исключаем её из расчётной модели (рис.4.18)

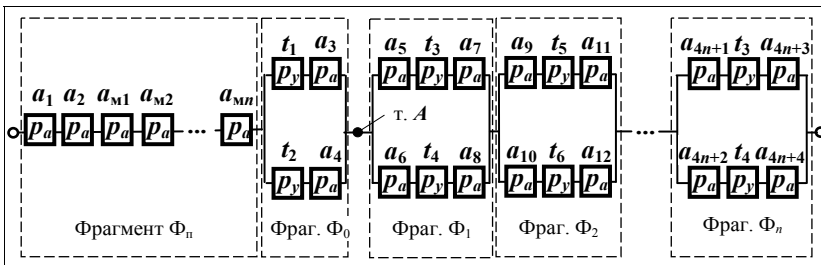


Рис. 4.18 – Расчётная модель функциональной надёжности трубопроводной системы с произвольным числом перемычек  $B$ -типа

Расчётная модель для сети с произвольным числом перемычек  $B$ -типа значительно отличается от аналогичной модели с пе-

ремычками А-типа. Основная причина – выход из строя задвижек  $a_j$ ,  $j \in \{3, 4n+4\}$ , не влечёт за собой прекращения поставки ЦП потребителю. В свою очередь, выход из строя дополнительно введенных задвижек  $a_{mk}$ ,  $k \in \{1, n\}$ , выводит из строя всю систему на время ремонта. Только задвижки  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_{4n+3}$  и  $a_{4n+4}$  не меняют своего характера относительно влияния на функциональную надёжность системы.

Задвижкам  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_{m1}$ ,  $a_{m2}$ , ...,  $a_{mn}$  в расчётной модели соответствует последовательная модель надёжности (фрагмент модели  $\Phi_n$ ), которая определяет эквивалентную вероятность транспорта ЦП через эти задвижки

$$P_{\Phi_n}^{fB} = p_a^{n+2}. \quad (4.29)$$

Поскольку выражение (4.29) учитывает влияние технической надёжности центральных задвижек  $a_{m1}$ ,  $a_{m2}$ , ...,  $a_{mn}$  всех перемычек и трубопроводные части перемычек обладают абсолютной надёжностью, то перемычки на расчётной модели трансформируются в точку. Например, первую перемычку можно интерпретировать как т. А (рис.4.18). Все точки-перемычки разбивают смешанную модель надёжности на фрагменты  $\Phi_k$ ,  $k \in \{0, n\}$ . Выход из строя любой части сети, соответствующей фрагменту  $\Phi_k$  или фрагменту  $\Phi_n$ , приводит к прекращению подачи ЦП потребителю. Поэтому все фрагменты образуют также последовательную модель надёжности, т.е. искомая функциональная надёжность сети определяется выражением

$$P^{fB} = P_{\Phi_n}^{fB} \prod_{k=0}^n P_{\Phi_k}^{fB}, \quad (4.30)$$

где  $P_{\Phi_k}^{fB}$  – функциональная надёжность  $k$ -й части сети, состоящей из параллельных участков  $t_{2k+1}$  и  $t_{2k+2}$ .

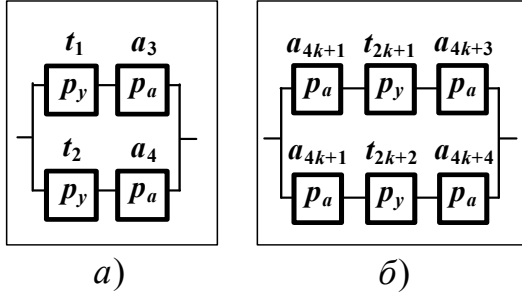


Рис. 4.19. Фрагменты модели надёжности магистральной трубопроводной сети с перемычками В-типа

Фрагмент  $\Phi_0$  расчётной схемы представляет собой параллельную модель двух последовательных цепочек (рис. 4.19,а). Одна цепочка определяет надёжность участка сети с трубопроводом  $t_1$  и задвижкой  $a_3$ , а другая – надёжность сети с трубопроводом  $t_2$  и задвижкой  $a_4$ . ЦП будет поступать потребителю, если хотя бы одна из цепочек находится в исправном состоянии. Поэтому цепочки образуют параллельную модель надёжности, согласно которой надёжность фрагмента  $\Phi_{n+1}$  определяется выражением

$$P_{\Phi_0}^{fB} = 1 - (1 - p_y p_a)^2. \quad (4.31)$$

Для остальных фрагментов  $\Phi_k$  (рис. 4.19,б);  $k \in \{\overline{1, n}\}$ , надёжность определяется аналогичным образом за исключением того, что в каждой параллельной цепочке теперь отсутствует техническая надёжность задвижки  $p_a$ :

$$P_{\Phi_k}^{fB} = 1 - \left(1 - p_y p_a^2\right)^2. \quad (4.32)$$

Подставляя (4.29), (4.31) – (4.32) в (4.30), получим математическую модель функциональной надёжности всей магистральной сети в зависимости от технической надёжности отдельных её конструктивных элементов при произвольном количестве ( $n$ ) перемычек  $B$ -типа

$$P^{fB} = p_a^{n+2} \left[1 - \left(1 - p_y p_a^2\right)^2\right] \left[1 - \left(1 - p_y p_a^2\right)^2\right]^n. \quad (4.33)$$

#### 4.3.3. Расчёт функциональной надёжности магистральной сети с перемычками $C$ -типа

Магистральной трубопроводной системе с произвольным числом перемычек  $C$ -типа соответствует схема, изображенная на рис. 4.20.

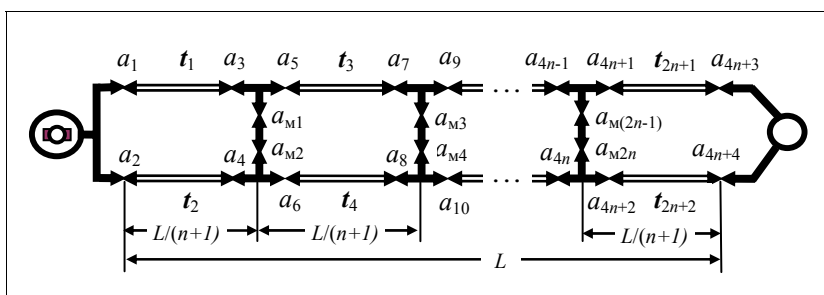


Рис. 4.20 – Схема магистральной трубопроводной системы с произвольным числом перемычек  $C$ -типа



Пусть магистральной сети с перемычками С-типа присущи те же особенности, что и сетям на рис. 4.12 и 4.16. Отличие сети на рис. 4.20 от сети на рис. 4.16 заключается только в наличии спаренных центральных задвижек в каждой перемычке. Таким образом, перемычки С-типа увеличивают общее число задвижек сети на величину  $2n$  по сравнению с перемычками А-типа и на  $n$  по сравнению с перемычками В-типа.

Граф аварийно-ремонтных зон для магистральной трубопроводной системы с произвольным числом перемычек С-типа будет иметь вид, показанный на рис. 4.21.

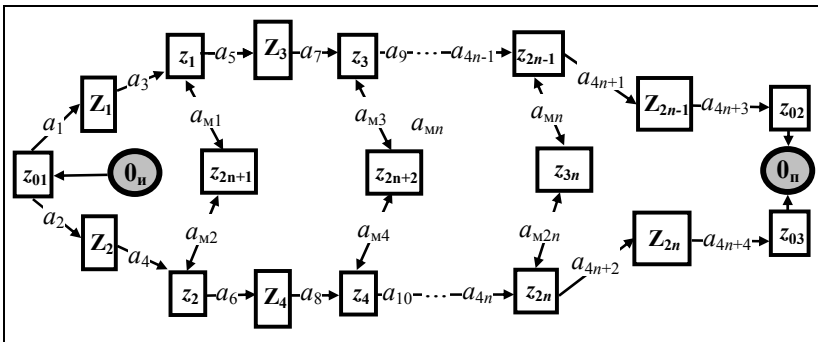


Рис.4.21 – Граф аварийно-ремонтных зон магистральной трубопроводной системы с произвольным числом перемычек С-типа

Длина трубопроводных участков в зонах  $z_1, z_2, \dots, z_{3n}$ , как в зонах  $z_{01}, z_{02}, z_{03}$ , намного меньше длины каждого из участков  $t_1, t_2, \dots, t_{2n}$ , находящихся в зонах  $Z_1, Z_2, \dots, Z_{2n}$ . Поэтому принимаем вероятность безотказной работы каждой из зон  $z_1, z_2, \dots, z_{3n}$  и  $z_{01}, z_{02}, z_{03}$  равной единице и исключаем её из расчётной модели (рис.4.22)

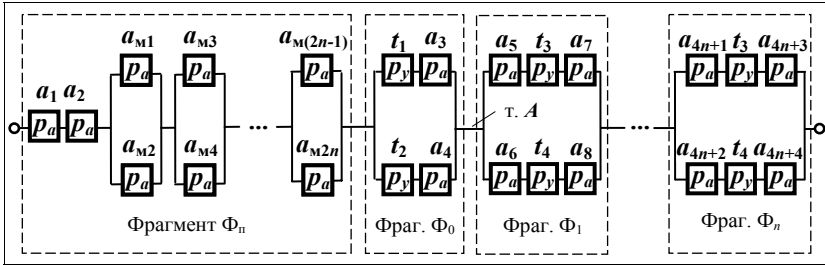


Рис. 4.22 – Расчётная модель функциональной надёжности магистральной сети с произвольным числом перемычек С-типа

Расчётная модель для сети с произвольным числом перемычек С-типа отличается от аналогичной модели с перемычками В-типа только фрагментом  $\Phi_n$ .

Одновременный выход из строя задвижек  $a_{m(2k-1)}$  и  $a_{m(2k-1)}$ , принадлежащих одной и той же  $k$ -й перемычке ( $k \in \{1, n\}$ ), приводит к прекращению подачи ЦП потребителю. Поэтому все пары задвижек образуют последовательную модель надёжности с остальной частью сети. Выход из строя одной из пары задвижек  $a_{m(2k-1)}$  и  $a_{m(2k-1)}$  не приводит к прекращению поставки ЦП потребителю. Поэтому каждая пара задвижек образует между собой параллельную модель надёжности. Указанные особенности влияния центральных задвижек перемычек на функциональную надёжность системы приводят к новой математической модели для фрагмента  $\Phi_n$ :

$$P_{\Phi_n}^{fC} = p_a^2 \left[ 1 - (1 - p_a)^2 \right]^n. \quad (4.34)$$

С учётом (4.34) функциональной надёжности всей магистральной сети с произвольным числом перемычек С-типа трансформируется из (4.33) в выражение

$$P^{fC} = p_a^2 \left[ 1 - (1 - p_a)^2 \right]^n \left[ 1 - (1 - p_y p_a)^2 \right] \left[ 1 - (1 - p_y p_a^2)^2 \right]^n. \quad (4.35)$$

#### 4.3.4. Сравнительный анализ на надёжность магистральных сетей с различным устройством перемычек

Математические модели функциональной надёжности (4.28), (3.33) и (3.35) позволяют ответить на два важных вопроса: какой тип перемычек имеет наибольшую практическую целесообразность и какое влияние каждый тип перемычек в численном выражении оказывает на функциональную надёжность всей магистральной системы.

Для сравнения перемычек В-типа и А-типа найдём отношение  $P^{fB}$  к  $P^{fA}$  для произвольного числа перемычек  $n$ , т.е. отношение выражения (4.33) к (4.29):

$$\begin{aligned} \frac{P^{fB}}{P^{fA}} &= \frac{p_a^{n+2} \left[ 1 - (1 - p_y p_a)^2 \right] \left[ 1 - (1 - p_y p_a^2)^2 \right]^n}{p_a^{4n+2} \left[ 1 - (1 - p_y)^2 \right]^n \left[ 1 - (1 - p_y p_a)^2 \right]} = \\ &= \frac{\left[ 1 - (1 - p_y p_a^2)^2 \right]^n}{p_a^{3n} \left[ 1 - (1 - p_y)^2 \right]^n} = \frac{1}{p_a^{3n}} \left[ \frac{1 - (1 - p_y p_a^2)^2}{1 - (1 - p_y)^2} \right]^n = \\ &= \frac{1}{p_a^{3n}} \left[ \frac{p_y p_a^n (2 - p_y p_a^2)}{p_y (2 - p_y)} \right]^n = \frac{1}{p_a^n} \left( \frac{2 - p_y p_a^2}{2 - p_y} \right)^n. \quad (4.36) \end{aligned}$$

Из (4.36) следует, что

$$P^{fB} = \frac{1}{p_a^n} \left( \frac{2 - p_y p_a^2}{2 - p_y} \right)^n P^{fA}. \quad (4.37)$$

Оба коэффициента в правой части (4.37)  $\frac{1}{p_a^n}$  и  $\left( \frac{2 - p_y p_a^2}{2 - p_y} \right)^n$

больше единицы, поскольку числители дробных коэффициентов превышают знаменатели. А значит, функциональная надёжность магистральной трубопроводной сети с использованием перемычек *В*-типа значительно выше, чем с использованием перемычек *А*-типа:

$$P^{fB} \gg P^{fA}. \quad (4.38)$$

Не менее важным показателем надёжности является ремонтно-пригодность. И этот показатель для систем с перемычками *В*-типа выше. Если в системе с перемычками *А*-типа подача ЦП потребителю прекращается при проведении ремонтно-профилактических работ на задвижках  $a_j$  ( $j \in \{1, (4n+2)\}$ ), то в системе с перемычками *С*-типа подача ЦП прекращается только при проведении ремонтно-профилактических работ на задвижках  $a_1, a_2, a_{m1}, a_{m2}, \dots, a_{mn}$ , что на  $3n$  задвижек меньше.

Для сравнения перемычек *С*-типа и *В*-типа найдём отношение  $P^{fC}$  к  $P^{fB}$  для произвольного числа перемычек  $n$ , т.е. отношение выражения (4.35) к (4.33):

$$\frac{P^{fC}}{P^{fB}} = \frac{p_a^2 [1 - (1 - p_a)^2] [1 - (1 - p_y p_a)^2] [1 - (1 - p_y p_a^2)^2]^n}{p_a^{n+2} [1 - (1 - p_y p_a)^2] [1 - (1 - p_y p_a^2)^2]^n} =$$

$$= \frac{[1 - (1 - p_a)^2]}{p_a^n} = \frac{p_a^n (2 - p_a)^n}{p_a^n} = (2 - p_a)^n. \quad (4.39)$$

Из (4.39) следует, что

$$P^{fC} = (2 - p_a)^n P^{fB}. \quad (4.40)$$

В правой части (4.40) коэффициент  $(2 - p_a)^n$  больше единицы. Поэтому функциональная надёжность магистральной трубопроводной сети с использованием перемычек С-типа выше, чем с использованием перемычек В-типа:

$$P^{fC} > P^{fB}. \quad (4.41)$$

Кроме того, показатель ремонтпригодности также выше. Если в системе с перемычками В-типа подачи ЦП потребителю прекращения при проведении ремонтно-профилактических работ на задвижках  $a_1, a_2, a_{M1}, a_{M2}, \dots, a_{Mn}$ , то в системе с перемычками С-типа подача ЦП прекращается только при проведении ремонтно-профилактических работ на задвижках  $a_1$  и  $a_2$ , что на  $n$  задвижек меньше.

Таким образом, сравнительный анализ показал, что:

– функциональная надёжность магистральной сети из двух протяженных параллельных трубопроводов, симметрично разделённых перемычками С-типа, выше чем функциональная надёжность сети с использованием задвижек В-типа и А-типа:

$$P^{fC} > P^{fB} \gg P^{fA}; \quad (4.42)$$

– перемычки С-типа обеспечивают возможность проведения профилактических или ремонтных работ на любом элементе сети за исключением только задвижек  $a_1$  и  $a_2$ .

#### 4.4. Магистральная трубопроводная сеть с абсолютной ремонтопригодностью

Использование в магистральных трубопроводных сетях перемычек С-типа позволяет добиться высокой ремонтопригодности – только две задвижки  $a_1$  и  $a_2$  не дают данному показателю достичь абсолютного значения.

К сожалению, добиться того, чтобы все конструктивные элементы трубопроводной сети имели возможность проходить ремонтно-профилактические работы, в рамках самой сети не представляется возможным. Однако на уровне магистральной системы это легко достигается путём резервирования насосного агрегата (рис. 4.23).

В системе, изображённой на рис. 4.23, выход из строя любого элемента не влечёт за собой прекращение подачи ЦП потребителю. Модель надёжности трубопроводной сети в этом случае соответствует схеме на рис. 4.24.

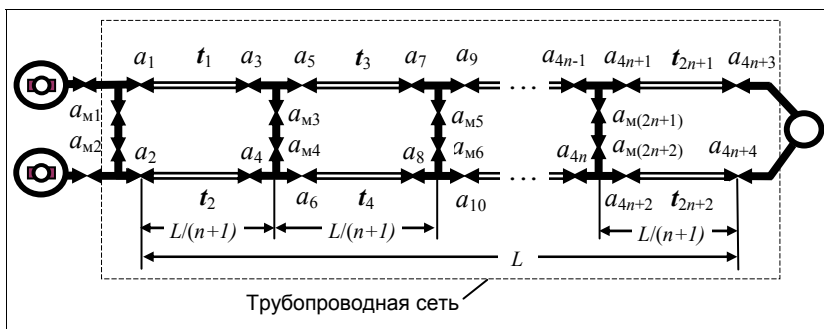


Рис. 4.23 – Схема магистральной трубопроводной системы с произвольным числом перемычек С-типа

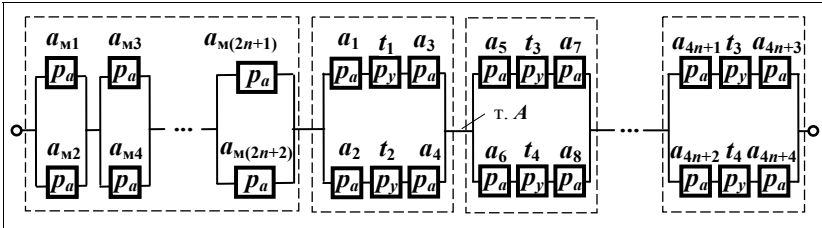


Рис. 4.24 – Расчётная модель функциональной надёжности магистральной сети с абсолютной ремонтпригодностью

Математическая модель функциональной надёжности принимает вид

$$P^f = \left[ 1 - (1 - p_a)^2 \right]^{n+1} \left[ 1 - (1 - p_y p_a^2)^2 \right]^{n+1}. \quad (4.43)$$

Сравнительный анализ функциональных надёжностей систем, приведенных на рис. 4.20 и 4.23, говорит также в пользу последней. При абсолютной ремонтпригодности система на рис. 4.29 обладает и большей надёжностью:

$$P^f = (2 - p_a) \frac{(2 - p_y p_a^2)}{(2 - p_y p_a)} P^{fC}, \quad (4.44)$$

т.е.

$$P^f > P^{fC}.$$

**Общий вывод.** Метод расчёта функциональной надёжности трубопроводных транспортных систем [4] позволил од-

**нозначно определить функциональные надёжности магистральной симметричной сети с различными типами перемычек. Сравнительный анализ полученных функциональных надёжностей выделил тип перемычек с шестью задвижками как наиболее целесообразный для практического использования.**



## ***Послесловие***

Основным научным результатом настоящей монографии является метод расчёта функциональной надёжности трубопроводных транспортных систем. Метод сформировался в результате диссертационного исследования Гавриленко И.А. «Надёжность поставки целевого продукта в сложных трубопроводных транспортных системах», выполненного на кафедре прикладной математики и информационных технологий Харьковской национальной академии городского хозяйства под руководством проф. Самойленко Н.И.

Научные исследования, связанные с функциональной надёжностью сетевых структур, проводились на кафедре и ранее. Первая диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук «Методы, критерии и алгоритмы принятия решений по эксплуатации и развитию инженерных сетей с учётом их надёжности» была защищена Рудем И.А. под руководством проф. Самойленко Н.И. в 2001 г.

Работа Рудя И.А. была ориентирована на разработку программного инструментария для автоматизированного управления инженерными сетями, в т.ч. и трубопроводными транспортными системами. Основной задачей диссертационных исследований Рудя И.А. являлась разработка расчётного метода, позволяющего в процессе эксплуатации сложных инженерных сетей проводить сравнительный анализ по критерию надёжности двух и более возможных вариантов структурных изменений сети. Для решения поставленной задачи было достаточно получить оценку функциональной надёжности сети, что успешно и было реализовано диссертантом.

## Послесловие

Работа Гавриленко И.А. является органичным продолжением исследований Рудя И.А. В разработанном Гавриленко И.А. семи-этапном методе расчёта функциональной надёжности трубопроводных транспортных систем в основу первых двух этапов положены исследования Рудя И.А. Эти исследования касаются расчёта технической надёжности трубопроводов в рамках одной аварийно-ремонтной зоны трубопроводной сети.

Перед Гавриленко стояла новая задача – разработать метод *точного* расчета функциональной надёжности трубопроводных распределительных и магистральных систем. В результате исследований был получен результат, который принципиально меняет методику расчёта. Исследования Гавриленко И.А. показали несостоятельность использования в расчёте функциональной надёжности мостовых соединений (перемычек) в *магистральных* трубопроводах формулы «полной вероятности» [6], поскольку выход из строя перемычки приводит не к мостовой модели расчёта надёжности, а к последовательной.

Работа Гавриленко И.А. и данная монография положены в основу общей теории функциональной надёжности трубопроводных транспортных систем, разрабатываемой на кафедре прикладной математики и информационных технологий Харьковской национальной академии городского хозяйства. Важными научными задачами, которые предстоит решить исследователям для завершения разработки теории, являются:

1. Обобщение метода расчёта функциональной надёжности на случай двух и более источников целевого продукта.
2. Разработка алгоритма расчёта функциональной надёжности сети относительно аварийно-ремонтных зон с учётом возможных мостовых соединений в графе АРЗ.
3. Определение критических соотношений параметров мостовых соединений и оптимального количества перемычек в магистральных трубопроводных системах.

Решение первых двух задач позволит сделать семиэтапный метод расчёта, с одной стороны, универсальным, позволяющим рассчитывать функциональную надёжность независимо от:

- количества и мест расположения источников целевого продукта в системе;

- технической надёжности аварийно-ремонтной зоны, выступающей в качестве моста в сетевой структуре трубопроводной системы, когда для расчёта функциональной надёжности следует прибегать к формуле «полной вероятности».

С другой стороны, дальнейшие исследования, и в частности решение третьей задачи, могут привести к разбиению теории функциональной надёжности трубопроводных систем на две самостоятельные части. Одну – для распределительных систем, другую – для магистральных.

Теория функциональной надёжности таит в себе много интересных и исключительно важных для жизнеобеспечения людей задач. Решить их и обогатить теорию новыми научными результатами – почётный и достойный труд для любого учёного. Теория функциональной надёжности ждёт своих исследователей, и в том числе – молодых!

*Проф., д-р техн. наук Самойленко Н.И.*

## СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

**безотказность** – свойство системы непрерывно сохранять *работоспособность* [4, т.3, с.854]

**большая система** – управляемая система, рассматриваемая как совокупность взаимосвязанных управляемых подсистем, объединенных общей целью функционирования [4, т.3, с.531]

**вероятность** – возможность осуществления чего-либо [29, с.65]

**вероятность мат.** – числовая характеристика степени возможности появления какого-либо определенного события в тех или иных определенных, могущих повторяться неограниченное число раз условиях [29, т.3, с.854]

**вероятность безотказной работы  $R(t)$**  – важнейший количественный показатель *надежности*, равный *вероятности* того, что за время  $t$  система не достигнет состояния отказа [29, т.3, с.854]

**долговечность** – свойство технической системы непрерывно сохранять *работоспособность* с необходимыми перерывами для ремонтов и технического обслуживания при условии экономической целесообразности дальнейшей эксплуатации [29, т.3, с.854]

**Кирхгофа первое правило** – алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю, если считать подходящие к узлу токи положительными и отходящие – отрицательными [23, с.201]

**Кирхгофа второе правило** – алгебраическая сумма произведений токов на сопротивления (включая и внутреннее) равна алгебраической сумме электродвижущих сил, действующих в замкнутом контуре. При этом и токи, и электродвижущие силы, совпадающие с произвольно выбранным направлением обхода конту-

ра, считаются положительными, а направленные навстречу обходу – отрицательными [23, с.201]

**магистральный трубопроводный транспорт** – вид *трубопроводного транспорта*, осуществляющий транспорт продукта от места добычи к местам переработки и потребления [4, т.26, с.261]

**надежность** – понятие, включающее в себя *безотказность, долговечность*, приспособленность к ремонту [29, т.3, с.854]

**надежность изделия** – свойство изделия сохранять значения установленных параметров функционирования в определенных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования, технического обслуживания, хранения и транспортирования. Надежность – комплексное свойство, которое в зависимости от назначения изделия и условий его эксплуатации может включать *безотказность, долговечность, ремонтпригодность* и *сохраняемость* в отдельности или определенное сочетание этих свойств как изделия в целом, так и его частей [4, т.17, с.205]

**надежность кибернетической системы** – способность систем сохранять свои наиболее существенные свойства (безотказность, ремонтпригодность и др.) на заданном уровне в течение фиксированного промежутка времени при определенных условиях эксплуатации [47, т.2, с.60]

**одоризация** – придание газу характерного запаха [4, т.26, с.316]

**отказ** – постепенная или внезапная потеря устройством работоспособности [29, т.3, с.854]

**оптимальное резервирование** – одна из экстремальных задач в теории надежности [29, т.3, с.856]

**промышленный трубопроводный транспорт** – вид *трубопроводного транспорта*, осуществляющий транспортировку грузов, поддающихся передаче по трубам, в пределах производственного предприятия для продолжения технологического процесса. К промышленному трубопроводному транспорту относятся нефтебазовые, внутрипромысловые нефте-, газо- и продуктопро-

воды, городские газоразводящие, водопроводные и канализационные сети [4, т.26, с.261]

**работоспособность** – состояние изделия, при котором оно соответствует всем требованиям, предъявляемым к его основным параметрам [4, т.17, с.205]

**работоспособность** – способность много и производительно работать [33, с.553]

**резервирование** – метод повышения *надежности* путем введения избыточности того или иного рода [29, т.3, с.855]

**ремонтотприспособленность** – свойство системы, определяющее удобство её технического обслуживания и проведение ремонтных работ [29, т.3, с.854]

**санация** (лат. sanatio – лечение, оздоровление) – система мероприятий по восстановлению физически изношенных технических объектов, в т.ч. трубопроводов [33, с.621]

**сеть** – система путей, линий, расположенных на каком-нибудь пространстве [33, с.621]

**сложная техническая система** – техническая система, состоящая из конструктивно независимых узлов, обладающая способностью перестраивать свою структуру для сохранения работоспособности при отказе отдельных частей и имеющая два и более работоспособных состояний [4, т.17, с.206]

**сохраняемость** – свойство изделия, устройства, сооружения непрерывно сохранять (в заданных пределах) значения установленных для них показателей качества во время и после хранения и транспортировки [4, т.24, с.216]

**структура** – взаимное расположение частей, составляющих одно целое [33, с.673]

**суммарная вероятность работоспособности системы** – один из возможных показателей надежности *сложной технической системы*, равный сумме вероятностей всех работоспособных состояний системы [4, т.17, с.206]

**транспорт** – область материально производства, связанная с перемещением людей и грузов [4, т.26, с.154]

**топография** – поверхность какой-либо местности; взаимное расположение её пунктов, частей [45, с.500]

**трубопровод** – сооружение для транспортировки газообразных и жидких веществ, твердого топлива, строительных материалов, зерна и др. под воздействием разности давлений (напоров) в различных сечениях [4, т.26, с.260]

**трубопроводный транспорт** – вид транспорта, осуществляющий передачу на расстояние жидких, газообразных и твердых продуктов по *трубопроводам* [4, т.27, с.260–261]

**функциональная надёжность системы** – вероятность выполнения функциональной задачи системы в течение определённого периода времени  $T$

**функциональная надёжность трубопроводной транспортной системы** – вероятность бесперебойной поставки целевого продукта потребителю в течение определённого периода времени  $T$

**функция интенсивности отказа  $\lambda(t)$**  – условная плотность распределения *отказа* при условии, что техническая система проработала безотказно время  $t$ . Если существует плотность распределения  $f(t) = F'(t)$ , то  $\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$  [29, т.3, с.854–855]

**функция распределения наступления отказа  $F(t)$  до момента  $t$**  – разность между 1 и *вероятностью безотказной работы*, т.е.  $1 - R(t)$  [29, т.3, с.854]

**целевой продукт** – продукт, транспортируемый потребителю по *трубопроводу*. В качестве целевого продукта могут выступать природный газ, вода, нефть, сжатый воздух, тепло и т.п.

### Список использованной литературы

1. *Абрамов Н.Н.* Теория расчета систем подачи и распределения воды. – М.: Стройиздат, 1972. – 288 с.
2. *Абрамов Н.Н., Пospelов М.М.* Расчёт водопроводных сетей. – М.: Госстройиздат, 1962. – 227 с.
3. *Беляев Ю.К.* Статистические методы в теории надежности. – М.: Знание, 1978. – 66 с.
4. Большая советская энциклопедия. – М.: Сов. энциклопедия, 1970–1978. – Т.3, 17, 24, 26.
5. *Вендров А.М.* CASE-технологии. Современные методы и средства проектирования информационных систем. – СПб: БХВ, 2000. – 240 с.
6. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
7. *Гавриленко И.А., Самойленко Н.И.* Анализ методов оценки надёжности трубопроводных транспортных систем в автоматизированных системах управления // Коммунальное хозяйство городов, К.: Техника, 2005. – Вып. 63. – С.195–199.
8. *Гавриленко И.А., Самойленко Н.И.* Расчёт надёжности поставки целевого продукта конкретному потребителю в системах трубопроводного транспорта // Коммунальное хозяйство городов, К.: Техника, 2006. – Вып. 67. – С.222–228.
9. *Гавриленко И.А., Самойленко Н.И.* Эксплуатация и проектирование систем тепло-, газо- и водоснабжения с учетом надежности // II Всеукраинская научно-практическая конференция «Проблемы и перспективы энерго-, ресурсосбережения жилищно-коммунального хозяйства». – Алушта, ХО НТТ КГ и ПО, ХНАГХ, 2006. – С. 77-79.
10. *Гавриленко І.О.* Надійність постачання цільового продукту в складних трубопровідних транспортних системах. – Автореферат дис...канд..техн. наук: 05.22.01.– Харків: ХНАМГ, 2006. – 22 с.



11. *Гальперин Е.М.* Расчёт кольцевых водопроводных сетей с учётом надёжности функционирования. – Саратов: Саратовский ГУ, 1989. – 104 с.
12. *Гнеденко Б.В., Коваленко И.Н.* Введение в теорию массового обслуживания. – М.: Наука, 1987. – 336 с.
13. ГОСТ 27.002-83 Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Госстандарт, 1984.
14. *Душкин С.С., Краев И.О.* Эксплуатация систем водоснабжения и водоотведения. – К., 1993.–164 с.
15. *Евдокимов А.Г.* Минимизация функций и её приложения к задачам автоматизированного управления инженерными сетями. – Харьков: Вища. шк., 1980. – 208 с.
16. *Евдокимов А.Г., Панасенко А.А.* Оптимизация потокораспределения в инженерных сетях. – Харьков: Основа, 1996.–136 с.
17. *Евдокимов А.Г., Тевяшев А.Д.* Оперативное управление потокораспределением в инженерных сетях. – Х.: Вища школа, 1980. – 144 с.
18. *Ильин Ю.А.* Надёжность водопроводных сооружений и оборудования. – М.: Стройиздат, 1985. – 240 с.
19. *Ильин Ю.А.* Расчет надёжности подачи воды. – М.: Стройиздат, 1987. – 320 с.
20. Интегрированная диалоговая система рациональной эксплуатации и развития систем подачи и распределения воды / Под общ. ред. *Евдокимова А.Г. и Самойленко Н.И.* – Донецк: РИП «Лепедь», 1994. – 192 с.
21. *Ионин А.А.* Надёжность систем тепловых сетей. – М.: Стройиздат, 1989. – 268 с.
22. *Ионин А.А.* Газоснабжение. – М.: Стройиздат, 1989.– 439 с.
23. *Карякин Н.И., Быстров К.Н., Куреев П.С.* Краткий справочник по физике. – М.: Высш. шк., 1963. – 560 с.
24. *Клемин А.И.* Надёжность ядерных энергетических установок. Основы расчета. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 344 с.
25. *Коваленко И.Н.* Исследования по анализу надёжности сложных систем. – Киев: Наук. думка, 1976. – 211 с.

## Литература

26. *Коваленко И.Н., Кузнецов И.Ю.* Методы расчета высоконадежных систем. – М.: Радио и связь, 1988. – 176 с.
27. *Королюк В.С., Турбин А.Ф.* Полумарковские процессы и их приложения. – К.: Наук. думка, 1976. – 138 с.
28. *Лосев Э.А.* Топологические методы нахождения вероятностных характеристик системы электроснабжения промышленных предприятий (Тр. ВНИИПЭМ). – М.: Энергоатомиздат, 1987. – С. 111-115.
29. Математическая энциклопедия. – М.: Сов. энциклопедия, 1977–1985. – Т.3. – 1184 стб.
30. Надежность систем энергетики и их оборудования. Справочник: В 4-х т. / Под общ. ред. *Ю.Н. Руденко*. Т.2. Надежность электроэнергетических систем / Под ред. *М.Н. Розанова*. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 568 с.
31. Надежность систем энергетики и их оборудования. Справочник: В 4-х т. / Под общ. ред. *Ю.Н. Руденко*. Т.4. Надежность систем теплоснабжения – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 351 с.
32. Надежность технических систем: Справочник / Под ред. *И.А. Ушакова*. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.
33. *Ожегов С.И.* Словарь русского языка. – М.: Рус. яз., 1986. – 797 с.
34. *Петросов В.А.* Управление региональными системами водоснабжения. – Харьков: Основа, 1999. – 320 с.
35. Рациональная эксплуатация и развитие систем водоснабжения и водоотведения. Т.1. Компьютеризация в системах водоснабжения / Под ред. *Евдокимова А.Г и Самойленко Н.И.* – Харьков: ХТУРЭ, 1997. – 276 с.
36. *Рудь И.А.* Методы, критерии, и алгоритмы принятия решений по эксплуатации и развитию инженерных сетей с учётом их надёжности. – Дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06. – Харьков, 2001. – 153 с.
37. *Рудь И.А.* Модели надёжности технических систем с мостовым соединением элементов // Радиоэлектроника и информатика, Харьков, 2000. №3 – С.86-87.

38. *Рудь И.А.* Расчёт надёжности технических систем с мостовым соединением элементов // Коммунальное хозяйство городов, К.: Техніка, 1999. – С.37–42. – Вып. 20. – Ч.1.

39. *Рудь И.А., Самойленко Н.И.* Эксплуатация и развитие инженерных сетей с учётом надёжности // Современные проблемы гуманизации и гармонизации управления. Материалы II Международной междисциплинарной НПК. – Харьков, 2001. – С.142–143.

40. *Рябинин И.А.* Основы теории и расчета надежности судовых электроэнергетических систем. Л.: Судостроение, 1971. – 347 с.

41. *Рябинин И.А., Киреев Ю.Н.* Надежность судовых электроэнергетических систем и судового оборудования. Л.: Судостроение, 1975. – 234 с.

42. *Самойленко Н.И.* Информационно-графические компьютерные технологии управления инженерными сетями предприятий, городов и регионов / Под ред. Самойленко Н.И. - Златоуст: Челябинский Дом печати, 1996. – 232 с.

43. *Самойленко Н.И.* Компьютерные интегрированные информационно-графические технологии рациональной эксплуатации и развития инженерных сетей. – Дис...д-ра техн. наук: 05.13.02; 05.13.04. – Харьков, 1996. – 370 с.

44. *Самойленко Н.И., Гавриленко И.А.* Метод расчёта функциональной надёжности трубопроводных транспортных систем // Устойчивое развитие городов. Материалы VI Международной НПК. – Харьков: ХНАХ, 2008.

45. Словарь иностранных слов. – М.: Рус. яз., 1986. – 608 с.

46. *Черкесов Г.Н.* Надежность технических систем с временной избыточностью. – М.: Сов. радио, 1974. – 296 с.

47. Энциклопедия кибернетики. – К.: Гл.редакция УСЭ, 1974.– Т2. – 624 с.

48. *Эндрени Дж.* Моделирование при расчетах надежности в электроэнергетических системах. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 336 с.

49. *Samoilenko M.I.* On emergency localisation in water supply networks. Pros. of the Third International Congress on Industrial and Applied Mathematics. Hamburg, 1995.

**Научное издание**

**САМОЙЛЕНКО Николай Иванович**

**ГАВРИЛЕНКО Ирина Александровна**

**ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ НАДЁЖНОСТЬ  
ТРУБОПРОВОДНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ  
СИСТЕМ**

*Под редакцией Самойленко Н.И.*

**Монография**

Отпечатано в типографии ООО «Современная Печать» на цифровом лазерном издательском комплексе Rank Xerox DocuTech 135, на цифровом лазерном комплексе Rank Xerox Docucolor 7000. Тираж 500 экз.

Адрес: г. Харьков, ул. Лермонтовская, 27.

Телефон: (057) 752-47-90.